

# Syvästabiloinnin suunnittelu

Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet



# Syvästabiloinnin suunnittelu

Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet

Liikenneviraston ohjeita 11/2010

*Kannen kuvat: Liikenneviraston arkisto*

ISSN-L 1798-663X  
ISSN 1798-663X  
ISBN 978-952-255-030-9

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-663X  
ISSN 1798-6648  
ISBN 978-952-255-031-6

Juvenesprint Oy  
Tampere 2010

Julkaisua myy/saatavana  
[myynti@juvenesprint.fi](mailto:myynti@juvenesprint.fi)

Liikennevirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelin 020 637 373

Tieosasto

Vastaanottaja  
ELY-keskusten Liikenne- ja infrastruktuuri  
- vastualueet,  
Liikenneviraston Tieinvestoinnit ja  
Tienpito -vastualueet

Säädösperusta  
Maantielaki 109 §

Korvaa/muuttaa  
Syvästabiloinnin suunnitteluohje TIEH 2100008-v-04

Kohdistuvuus  
Tiehallinto

Voimassa  
1.11.2010 - toistaiseksi

Asiasanat  
pohjarakenteet, pohjarakennus, syvästabilointi

## Syvästabiloinnin suunnittelu

Tässä ohjeessa esitetään yleiset vaatimukset pohjanvahvistuksena käytettävän syvästabiloinnin suunnittelulle ja mitoitukselle.

Ohjeessa on myös selostettu tuotantotekniikkaa, joka on tarkoitettu suunnittelijalle taustatiedoksi suunnitelmaa laadittaessa. Taustatiedoksi tarkoitettu teksti on esitetty kapealla palstaleveydellä.

Ohjetta sovelletaan eurokoodijärjestelmässä, joka on otettu käyttöön Liikenneviraston väylähankkeiden suunnittelussa 1.6.2010 alkaen. Geo-ohjeistuksen hierarkiaa on tarkemmin selostettu ohjeen luvussa 1.

Tämä ohje koskee vain maanteiden suunnittelua ja mitoitusta. Muiden teiden ja väylien suunnittelussa ohjetta voidaan käyttää soveltuvin osin.

Kehittämispäällikkö  
Tietekniikkayksikkö



Kari Lehtonen

Geoasiantuntija



Pentti Salo

LISÄTIETOJA  
Pentti Salo  
Liikennevirasto, tieosasto  
puh. 020 637 373

LIITE Ohjejulkaisu

TIEDOKSI Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL  
 Rakennusteollisuus RT  
 Infra ry  
 Suomen Kuntaliitto  
 Tekniset yliopistot/korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut  
 VTT  
 Helsingin kaupungin geotekninen osasto  
 Tie- ja geokonsultit  
 Ohjeen laatijat ja työhön osallistuneet asiantuntijat  
 Liikenneviraston osastot, tieosaston vastualueet, kirjasto  
 Tieinvestoinnit -yksikön projektipäälliköt  
 Liikenneviraston sillansuunnitteluyksikkö ja sillanrakentamisyksikkö  
 Liikenneviraston ja ELY-keskusten geoasiantuntijat

## Esipuhe

Ohjeen laatimista varten perustettiin syksyllä 2009 työryhmä, johon ovat kuuluneet ohjeen kirjoittaja Antti Junnila Innogeo Oy:stä sekä tilaajan edustajina Pentti Salo ja 2010 alkaen myös Tiina Perttula. Luvun 7 sekä kappaleiden 8.7 ja 8.3–8.6 sekä liitteen 4 tekstien luonnokset on laatinut sivukonsulttina Juha Forsman Ramboll Finland Oy:stä.

Varsinaiseen ohjetekstiin kuulumattomat selittävät lisäykset on esitetty kursiivilla.

Helsingissä lokakuussa 2010

Liikennevirasto  
Tieosasto

## Sisältö

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Ohjeen soveltamisala .....	8
1.2	Suunnittelussa käytettävät ohjeet .....	8
1.3	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL) .....	9
2	SYVÄSTABILOINTIMENETELMÄ .....	11
2.1	Tuotantotekniikan perusteet .....	11
2.1.1	Pilaristabilointi .....	11
2.1.2	Massasyvästabilointi .....	13
2.2	Pilarin ja maan yhteistoiminta .....	13
2.3	Pilaroinnin vaikutus stabiliteetin parantamisessa .....	13
2.4	Pilaristabilointien mitoitusperiaatteet .....	14
2.5	Määrämittaisten pilarien käyttö .....	15
2.6	Pilarien käyttö yhtenäisinä rakenteina .....	15
2.7	Stabilointia käyttäen perustettavat rakenteet .....	15
3	SIDEAINEET .....	17
4	PILARISTABILOINNIN MITOITUKSEN LÄHTÖTIEDOT .....	19
4.1	Pohjatutkimukset .....	19
4.2	Stabiloidun maan mitoitusparametrien määrittäminen .....	20
4.3	Kuormitusotaksumat .....	22
4.4	Rakentamisen reunaehdot .....	22
5	PILARISTABILOINNIN MITOITUS .....	24
5.1	Pilaristabiloidun maarakenteen vakavuus .....	24
5.1.1	Erilaiset kohteet ja vaatimukset .....	24
5.1.2	Vakavuus- ja siirtymätarkastelut .....	25
5.1.3	Lamellirakenteiden mitoitus .....	28
5.2	Penger kimmoisille pilareille .....	29
5.2.1	Kimmoisen pilaroinnin mitoitusperiaatteet .....	29
5.2.2	Kimmoisen pilaroinnin painumamitoitus .....	30
5.3	Pilaritiheyden tarkistaminen .....	34
5.4	Pilarien keskinäinen sijoitus .....	34
5.5	Putkijohtojen perustaminen syvästabiloinnille .....	35
5.6	Määrämittaisen stabiloinnin mitoitus .....	36
5.6.1	Määrämittaisten pilarien käytön edellytykset .....	36
5.6.2	Stabiliteetti ja mitoitus pilariryhmänä .....	37
5.6.3	Painuman laskenta .....	37
5.6.4	Painuma-aika ja painumanopeuden laskenta .....	38
6	STABILOIDUN RAKENTEEN SUUNNITTELUNÄKÖKOHTIA .....	40
6.1	Stabiloinnin leveyden määrittäminen .....	40
6.2	Työalusta .....	40
6.3	Pilarien kaltevuus .....	40
6.4	Lujitteiden käyttö .....	41
6.5	Esikuormituksen käyttö .....	41
6.6	Siirtymärakenteet syvästabiloinnin yhteydessä .....	42
6.7	Syvästabilointi poikkisuuntaisissa siirtymärakenteissa .....	43



---

6.8	Ympäristövaikutukset.....	43
6.9	Syvästabilointi tärinän leviämisen estämisessä .....	44
7	MASSASYVÄSTABILOINNIN SUUNNITTELU.....	46
7.1	Massasyvästabiloidut rakenteet .....	46
7.2	Tutkimukset.....	47
7.3	Massasyvästabiloinnin vakavuustarkastelut.....	48
7.4	Massasyvästabiloinnin painumatarkastelut.....	49
8	SYVÄSTABILOINTISUUNNITELMAN SISÄLTÖ JA LAADUNVALVONTA .....	52
8.1	Piirustukset.....	52
8.2	Laatuvaatimukset ja työselitykset.....	52
8.3	Syvästabiloinnin laadunvalvonnan sisältö .....	53
8.4	Toteutuneen syvästabiloinnin tutkimusmenetelmät.....	53
8.5	Valvontakairausten edustavuus.....	54
8.6	Tutkimusraportti.....	55
	KIRJALLISUUS .....	56

#### LIITTEET

Liite 1	Myötävän pilaroinnin mitoitus
Liite 2	Esimerkkimitoitus 2,5 m penkereelle.
Liite 3	Esimerkkitarkastelu putkijohtojen perustamisesta
Liite 4	Laadunvalvonta

# 1 Johdanto

## 1.1 Ohjeen soveltamisala

Tässä julkaisussa esitetään suunnittelu- ja mitoitusohjeet tiehankkeiden penkereiden ja luiskien sekä putkijohtojen perustamisesta syvästabiloimalla vahvistetulle maapohjalle. Ohjetta voidaan soveltuvin osin käyttää myös muiden rakenteiden perustusten suunnittelussa ja mitoituksessa.

Tässä ohjeessa käsitellään ns. kuivamenetelmällä tehtävä pilaristabilointi sekä mas-sasyvästabilointi. Tässä ohjeessa käsitellään pilareita, joiden

- leikkauslujuus on korkeintaan 200 kPa
- halkaisija on 500–800 mm
- maksimipituus on 20 m.

Tätä ohjetta voidaan soveltaa käytettäessä sideaineena kalkkia tai kalkkisementtiä sekä myös muita sideaineita edellyttäen, että niistä tunnetaan:

- seoksen osa-aineet, jotta voidaan arvioida työturvallisuustekijät sekä ympäristökelpoisuus
- lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet (erityisesti mahdollinen murtumisen hauraus)
- työtekeminen kelpoisuus, joka on todettu työmaaolosuhteissa

Ohjeessa esiintyvät keskeiset termit ovat:

Kimmoisa pilari	Pilarikuorma ei ylitä myötörajaa.
Myötäävä pilari	Pilarikuorma ylittää myötörajan ja rakenne painuu rakennusaikana. Myötäävät pilarit on käsitelty liitteessä 1, joka otetaan tarvittaessa käyttöön hankekohtaisella päätöksellä.
Määrämittainen pilari	Pilarien alapuolelle jätetään painuvia maakerroksia ja rakenne painuu myös käyttöaikana.

## 1.2 Suunnittelussa käytettävät ohjeet

Eurokoodit on laadittu käytettäväksi erityisesti kantavien rakenteiden suunnittelussa, mutta ne on otettu käyttöön myös maarakenteiden suunnittelussa. Eurokoodijärjestelmään kuuluvat eurokoodeja täydentävät kansalliset liitteet.

Maarakenteiden suunnittelussa käytetään hyväksi geoteknistä suunnittelua koskevaa eurokoodi 7:n osaa 1 ja Liikenne- ja viestintäministeriön siihen laatimaa kansallista

liitettä<sup>1</sup>, jota sovelletaan maanteiden ja muiden LVM:n alaisten väylien (rautatiet, vesiväylät) suunnittelussa ja rakentamisessa.

Suunnittelujärjestelmää täydentävät Liikenneviraston ohjeet:

- Eurokoodin 1997-1 ja kansallisen liitteen (LVM) sovellusohje
- ohje Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet TIEH 2100002-01.

Liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodi 7:aan laatima kansallinen liite ja Liikenneviraston siihen laatimat sovellusohjeet julkaistaan vuoden 2010 aikana. Ohje Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet TIEH 2100002-01 on toistaiseksi voimassa kuitenkin siten, että ristiriitatapauksessa kuten varmuuslukujen osalta pätevät LVM:n kansallinen liite, standardi ja sovellusohje tässä järjestyksessä.

Em. ohjekokonaisuus pätee suhteessa tähän ohjeeseen.

Muita syvästabiloinnin suunnittelussa käytettäviä ohjeita ovat:

- Geotekniset laskelmat TIEH 2100018-v-03
- Geotekniset tutkimukset ja mittaukset TIEH 2100057-08

Em. ohjeet ovat geoteknisiä suunnitteluohjeita. Kaikki pohjarakentamista koskevat ohjeet ja tietekniset suunnitteluohjeet on lueteltu Liikenneviraston ohjeluettelossa. Suunnittelun tulee perustua tieteknisen ja geoteknisen suunnittelun yhteensovittamiseen, jolloin ratkaisuja arvioidaan molemmista näistä näkökulmista ja otetaan huomioon tekniset, taloudelliset, turvallisuus- ja ympäristövaikutukset.

## 1.3 Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL)

InfraRYL 2010 sisältää kaksi osaa:

- toiminnalliset laatuvaatimukset ja
- tekniset laatuvaatimukset, sisältäen myös työlle esitettävä vaatimukset (yleiset työselostukset)

Liikennevirasto on ottanut käyttöön InfraRYL:n yleiset tekniset laatuvaatimukset siten, että sopimusasiakirjoissa viitataan aina InfraRYL:n teknisiin vaatimuksiin. Tiehankkeille laaditaan aina hankekohtaiset työselostukset ja laatuvaatimukset ne pätevät suhteessa yleisiin laatuvaatimuksiin. Hankekohtaisissa materiaalivaatimuksissa voidaan poiketa useimmista InfraRYL:ssä esitetyissä vaatimuksista, mutta osa vaatimuksista on säädetty LVM:n hallinnonalan ohjeistuksella pakollisiksi.

InfraRYL:ssä esitettyjä toiminnallisia vaatimuksia voidaan hyödyntää suunnittelussa, mutta sopimusasiakirjoissa niihin ei viitata.

---

<sup>1</sup> Ympäristöministeriö on laatinut talonrakentamista koskevan kansallisen liitteen, jonka sisältö poikkeaa LVM:n kansallisen liitteen sisällöstä. YM:n kansallista liitettä ei käytetä Liikenneviraston töissä.

---

Suunnittelu perustuu pääsääntöisesti suunnittelua koskeviin ohjeisiin. Suunnittelussa on tarkistettava mahdolliset InfraRYL:n hankekohtaiset muutostarpeet. Tarvittaessa teknisen osan vaatimuksia täydennetään ja korjataan työkohtaisessa osassa suunnitellun rakenteen tarpeita vastaaviksi. Hankekohtaiset laatuvaatimukset ja työselostukset -asiakirjan pohjaksi otetaan käytännössä InfraRYL:n laatuvaatimukset, joihin poikkeamat ja täydennykset merkitään selvästi.

InfraRYL:n yleisistä työselostuksista käytetään aina viimeisintä voimassa olevaa versiota

## 2 Syvästabilointimenetelmä

### 2.1 Tuotantotekniikan perusteet

#### 2.1.1 Pilaristabilointi

*Pilaristabiloinnissa pilarointikoneen sekoitinkärki upotetaan pilarin suunnittelun alapään tasoon ja sideaineen syöttö ja pilarin sekoitus aloitetaan yleensä sekoitinta ylös vedettäessä. Suomessa on käytetty lähes yksinomaan kuivamenetelmää, jossa jauhemainen sideaine syötetään paineilmaa käyttäen. Mm. Japanissa yleinen märkämenetelmä on Suomessa ainakin toistaiseksi rajoittunut muutama kokeiluun.*

*Pilarin halkaisijana on käytetty 500–800 mm. Yleisimpiä ovat 1990-luvun alkupuolelta asti olleet 600–700 mm pilarit. Mitä suurempi pilarin halkaisija on, sitä vaikeammaksi voi tulla tavallista kovemman kuivakuorikerroksen tai muiden lujien maakerrosten läpäisy. Suurilla pilarihalkaisijoilla saattaa myös tulla ongelmalliseksi saada sideaine jakautumaan tasaisesti koko pilarin poikkileikkausalalle. Toisaalta pienen pilarihalkaisijan ja suuren pilaripituuden yhdistelmä voi olla riskialtis sideaineen syötön ”melkein katko”-tilanteiden (alkava tukkeuma, joka aukeaa aiheuttamatta täystukosta ja sekoittimen nousun pysähtymistä) kannalta. Pitkän pilarin vaatimassa pitkässä letkussa tukkeumavaara on suurin ja pieniläpimittaisissa pilareissa sideaineen syötön pieni häiriö saattaa helpommin muodostua haitalliseksi kuin isompiläpimittaisessa.*

*Pilarien maksimipituus nykyisellä kalustolla on yleensä noin 18–20 m (jopa 24 m), mutta maksimia lähentelevät pilaripituudet ovat harvoin taloudellisia.*

*Sideaineen sekoituksella on suuri merkitys pilarin lujuuteen ja tasalaatuisuuteen. Oleellisia asioita ovat sideaineen syötön tasaisuus ja hallittavuus, riittävän tehokas sekoitustyö sekä paineilman käytön minimointi.*

*Sideaineen syöttömäärä rekisteröidään nykyisin yleensä 0,2 metrin mittaista pilarinosaa kohden. Mittaus perustuu yleensä säiliön massan vähenemiseen sideainetta syötettäessä, mikä asettaa rajoitukset todelliselle mittaustarkkuudelle. Erillinen säiliö saattaa parantaa tarkkuutta, kun koneen liike ei häiritse punnitusta. Tyypillisesti nykyisin päästään noin 1 kg mittaustarkkuuteen pilarimetriä kohden.*

*Sideaineen syöttömäärää pystytään säätämään syvyysuunnassa, ja tätä mahdollisuutta käytetään yhä useammin.*

Sekoitustyön tehokkuus (terätasokierrosta/pilarimetri) on riippuvainen terän noususta kierrosta kohti ja sekoittimen terätasomäärästä kaavan 1 mukaisesti.

sekoitustyön tehokkuus =  $n/\text{nousu kierrosta kohti}$  (1)

$n$  on terätasojen määrä sekoitinkärjessä (nykyisin tavallisesti 2–4) terän nousu/kierros (nykyisin yleensä 8–15 mm/r)

*Pilarikoneen terää maahan upotettaessa ilmaa työnnetään suuttimista ulos niiden tukkeutumisen estämiseksi. Ilman määrä ja paine pyritään minimoimaan, jotta saven häiriintyminen pysyisi vähäisenä. Tarvittavaa ilmamäärää voidaan pienentää mm. terän nopealla upottamisella sekä mahdollisesti myös*

kehittämällä suljettavat suuttimet. Sekoitustyön aikana syöttöpaine pyritään pitämään siinä minimiarvossa, jolla sideaine juoksee häiriöttä. Suuret pilarointisyvytykset lisäävät tarvittavaa painetta. Työssä noudatettava paine määritetään ennen varsinaisen työn aloitusta. Osassa pilarointikalustoja on nykyisin mahdollista pienentää syöttöpainetta, kun pilarin syvimät osat on tehty. Tästä on hyötyä pilarointisyvytyksien ylittäessä 15 m ja yli 20 m pilareilla paineen vaihtamismahdollisuus olisi lähes välttämätön. Toisaalta paineen pienentämishetkellä kasvaa sideaineen syöttöhäiriön riski. Pilariin syötetyn ilman poistumista voidaan todennäköisesti edistää käyttämällä nelikulmaista sekoittimen tankoa. Nelikulmaiset tangot ovat yleistyneet.

Stabilointityö saattaa aiheuttaa savipohjan häiriintymistä myös työkoneen liikkumisen, huojumisen ja tärinän vaikutuksesta. Koneiden painopisteen sijoittaminen mahdollisimman alas lieventää näitä vaikutuksia.

Toisinaan esiintyvä ongelma on aivan pilarin pintaosaan, nimenomaan kuivakuoren kohdalle, syntyvä heikko ja epähomogeeninen kohta ja ääritapauksissa lähes tyhjä reikä. Ongelma lienee osittain kalustokohtainen (sekoittimen terän muoto liian auraava, syöttöreian sijainti epäedullinen), mutta osittain sen syyt ovat edelleen hämärän peitossa. Jopa samalla työmaalla ja samalla kalustolla saattaa osalla pilareista olla yläosa lähes tyhjää ja osalla muodostua moitteetonta pilaria pintaan saakka. Joka tapauksessa kuivakuoren pieni vesipitoisuus vaikeuttaa sekoitustyötä ja stabilisoitumisreaktioita. Kuivakuoreen tehtävän pilarin yläpään onnistumista auttaa pystysuunnassa tapahtuva sekoittumien pehmeämmän saven kanssa. Kuivakuoren reikiintymisriskiä voidaan minimoida hiekasta tehtävän työalustan käytöllä, jolloin pilarit on helpompi onnistua ulottamaan ehjinä kuivakuoren yläpintaan saakka.

Stabilointikoneen terällä ei pystytä läpäisemään kiviä ja lohkareisia täyttöjä eikä tiivistettyjä mursketäyttöjä. Työalustana voidaan haluttaessa käyttää enintään noin 0,5 m tiivistämätöntä mursketäyttöä tai noin 1 m hiekkatäyttöä. Hiekkatäytön käyttö on Ruotsissa varsin yleistä. Sillä saavutettavia etuja on pilarien lievä kuormittuminen ja tiivistyminen jo lujittumisvaiheessa sekä parempi mahdollisuus estää edellä selostettua pilarin yläosan rikkonaisuusongelmaa ja saada pilarit ulottumaan ehjinä saven yläpintaan saakka.

Pelkkä poltettu kalkki oli 1980-luvun loppupuolelle asti selvästi yleisin sideaine. Kalkin hyviä ominaisuuksia on hyvä diffuusiivisuus, joka saattaa jossain määrin kompensoida epätasaista sekoitustyötä, sekä kalkkipilarien sitkeysominaisuudet ja lujittumisen jatkuminen vielä käyttöaikana. Huonoja puolia ovat yleensä melko matalaksi jäävä lujuus sekä soveltumattomuus humuspi-toisten savien stabilointiin.

Pelkällä sementillä voidaan laboratorio-olosuhteissa saavuttaa erittäin hyviä lujuuksia, mutta maastossa tehtävän sekoitustyön epätasaisuus aiheuttaa maastolujuuksien jäämisen yleensä selvästi pienemmiksi. Pilarit ovat yleensä hauraita ja lähinnä puristusrasituksia kestäviä.

Yleisin sideaine on 1990-luvun alusta asti ollut kalkin ja sementin seos, jota käytettäessä saadaan useimmiten parempi lujuus kuin pelkällä kalkilla ja hyvä lujittuminen myös humuspitoisissa savikerroksissa, ainakin riittäviä sideainemääriä käyttäen. Lisäksi kalkin mukanaolo estää edellä mainittuja pelkän sementin epäedullisia vaikutuksia. Yleisin kalkin ja sementin seossuhde on 1:1, mutta nykyisin muutkin sekoitussuhteet ovat työteknisesti mahdollisia.

2000-luvun alussa tulivat melko yleiseen käyttöön myös kipsin, sammutetun kalkin ja sementin seokset, jotka ovat monissa tapauksissa osoittautuneet hyvin toimiviksi liejuisissakin savissa.

*On myös käytetty sideaineita, joissa em. ainesten lisäksi voi olla mm. jauhetua masuunikuonaa, lentotuhkaa ym. teollisuuden sivutuotteita.*

### 2.1.2 Massasyvästabilointi

*Massasyvästabiloinnissa sekoituskoneen kärkeä liikutellaan stabiloitavassa maakerroksessa sekä pysty- että vaakasuunnassa. Stabilointisyvyyden käytännöllinen raja on noin 5 metriä, ihanteellisissa olosuhteissa hiukan suurempi. Sekoitustyön tasalaatuisuuden varmistaminen vaatii vielä kehittämistä. Massasyvästabilointia voidaan käyttää myös turpeessa. Massasyvästabilointi voidaan tehdä myös pilarointikoneella aivan vierä viereen tehdyin pilarein, jolloin päästään tasalaatuisimpaan sekoitustulokseen.*

*Massasyvästabilointia käytetään usein maalajeissa, joiden stabiloituvuus on liian huono pilaristabilointia ajatellen. Näiden maalajien stabilointi edellyttää useimmiten muita kuin tavanomaisia kalkista ja sementistä koostuvia sideaineita.*

## 2.2 Pilarin ja maan yhteistoiminta

Pilaroidussa maassa jännitykset jakautuvat pilareille ja pilareita ympäröivälle maalle muodonmuutosmoduulien suuruudesta riippuvalla tavalla. Pilaroinnin mielekäs toimintatapa saavutetaan, kun ei pyritä kohtuuttoman suuriin pilarilujuuksiin hyvin pehmeässä pohjamaassa. Pilari on lujitettua maata eikä kantava rakenne.

## 2.3 Pilaroinnin vaikutus stabiliteetin parantamisessa

*Stabilointi lisää maapohjan lujuutta, sillä pilarien lujuus on yleensä 5–15-kertainen alkuperäisen pehmeän pohjamaan lujuuteen nähden. Koska pilarien laatu vaihtelee ja koska pilarit kestävät varsin heikosti muita kuin puristusrasituksia, stabiloinnin vaikutus stabiliteettiin voi kuitenkin jäädä tavoiteltua heikommaksi ja epävarmemmaksi..*

*Stabiloinnilla voidaan varsin hyvin parantaa tasaiselle maalle tehtävän penkereen vakavuutta. Jos alkutilanteen vakavuus on heikko, maanpinta on kalteva tai penkereen sivulle tehdään kaivanto, stabiloinnin tehokkuus on huonempi ja lopputulos on herkempi stabiloinnin epäonnistumiselle. Tällaisissa tapauksissa pilareista yleensä muodostetaan yhtenäisiä seinämärakenteita, jotka paremmin kestävät sivusuuntaisia kuormia.*

*Luiskien ja kaivantojen vahvistamisessa pilarointi on osoittautunut epävarmaksi menetelmäksi, sillä luiskassa liukupinnat hakeutuvat stabiloinnin huonoimmin onnistuneisiin kohtiin aivan eri tavalla kuin penkereen alla olevassa maapohjassa, jossa satunnaiset laadunvaihtelut aiheuttavat stabiliteetin kannalta vaaratilanteita korkeintaan sivukaltevassa maastossa. Nykykäsityksen mukaan luiskissa ei tule käyttää yksittäisiä pilareita.*

Käytettäessä stabilointia luiskien vahvistamiseen erillisiä pilareita ei käytetä, vaan pilareista muodostetaan aina seinämärakenteita.

## 2.4 Pilaristabilointien mitoitusperiaatteet

Kimmoisa pilarointi määritellään tässä ohjeessa siten, että pilareille tuleva kuormitus jää alle myötörajan, jonka oletetaan olevan 70 % murtokuormituksesta. Tämä menetely on luonteeltaan vahvistetun maapohjan painumamitoituksen ohjaamista oikealle alueelle, eikä sitä pidä käsittää analogiseksi pohjarakenteiden mitoituksen kanssa. Kimmoisassa pilaroinnissa pilarilujuudet ovat maltillisia ja pilarien ja pohjamaan yhteistoiminnalla on merkitystä.

Käytettäessä kimmoisia pilareita, jolloin pilarien myötörajaa ei ylitetä, penkereen painumat rajoittuvat rakennusaikana lähes välittömästi tapahtuvaan pieneen painumaan.

*Pilarointia käytetään eniten penkereiden perustamiseen. Tyypillisissä tapauksissa penkereen vakavuus kasvaa minimivaatimuksia paremmaksi ja samalla käyttövaiheen aikaiset painumat käytännöllisesti katsoen poistuvat. Painumamitoitus on kimmoisien pilarien tapauksessa lähes aina määräävämpi kuin vakavuus.*

Myötävä pilarointi määritellään tässä ohjeessa siten, että pilarien myötökuorma (70 % murtokuormasta) ylittyy, jolloin ylijäävän kuormituksen oletetaan siirtyvän pilareita ympäröivän maan kannettavaksi ja pilarien kantavan jatkuvasti myötökuorman suuruisen kuorman, ks. kuva 7. Pilareita ympäröivälle maalle tuleva kuormitus aiheuttaa konsolidaatiopainumaa, jonka pilarien pystyjojamainen vaikutus nopeuttaa, ja painuma tapahtuu yleensä muutamassa kuukaudessa.

Myötäävien pilarien käyttö edellyttää, että pilarien jäännöslujuus on vähintään oletetun myötörajan suuruinen ja että pilarien vedenläpäisevyys on riittävän suuri pystyjojamaisen vaikutuksen aikaansaamiseksi taikka että myötäävän kerroksen paksuus on niin pieni, ettei pystyjojamaistakaan vaikutusta välttämättä tarvita. Jäännöslujuusvaatimuksen sekä pystyjojamaisen vaikutuksen voidaan katsoa täyttyvän ainakin käytettäessä sideaineena kalkkia tai kalkkisementtiä, josta vähintään puolet on kalkkia. Myötääviä pilareita on käytetty Ruotsissa laajasti, mutta Suomessa varsin harvoin.

**Myötävä pilarointi esitetään tässä ohjeessa liitteessä 1, joka astuu voimaan vain hankekohtaisella päätöksellä.**



## 2.5 Määrämittaisten pilarien käyttö

*Määrämittaisilla pilareilla tarkoitetaan pilareita, joita ei uloteta painuvan maakerroksen alarajaan, vaan joiden alapuolelle jätettävissä maakerroksissa harkitusti sallitaan penkereen käyttövaiheen aikaisia painumia.*

Määrämittaisten pilarien painumien laskenta on vaativaa laskentaotaksumien epätarkkuuden takia ja vaatii myös tavallista perusteellisempia pohjatutkimuksia painumaominaisuuksiltaan ratkaisevissa savikerrostumien alaosissa. Toisaalta jälkipainumat tapahtuvat syvällä ja paksu stabiloitu maakerros tasoittaa lievien epätasaisuuksien heijastumista tienpintaan. Kuitenkin erityisesti kovan pohjan syvyyden vaihtelut muodostavat riskin ratkaisun onnistumiselle.

Koska määrämittaisten pilarien mitoitus sisältää merkittäviä epävarmuuksia ja saavutettava painumastandardi on joka tapauksessa selvästi heikompi kuin tavanomaisilla täyssyvillä pilareilla, ratkaisun teknistaloudellinen edullisuus on harkittava tapauskohtaisesti ja varovaisesti.

Määrämittaisten pilarien käyttämisestä siirtymärakenteissa on lupaavia kokemuksia. Siirtymärakenteet ovat varsin paikallisia, jolloin pohjasuhteiden vaihteluriski jää pieneksi ja muutenkin mitoitusperusteiden epävarmuudesta aiheutuva haitta on paremmin hallittavissa kuin laajemmissa määrämittaisissa stabiloinneissa.

## 2.6 Pilarien käyttö yhtenäisinä rakenteina

*Kun stabiloinnilla vaaditaan erityisen hyvää kestokykyä vinoja kuormituksia vastaan, pilarit tehdään toisiinsa kiinni yhtenäisiksi rakenteiksi, jotka voivat olla seinämäisiä, blokkimaisia tai kaarevia. Pilarit voidaan tehdä toisiaan leikkaavina, jos stabilointityössä ei ole liian pitkiä taukoja.*

## 2.7 Stabilointia käyttäen perustettavat rakenteet

*Stabiloinnin käyttökohteita ovat:*

- penkereiden perustaminen
- putkijohtojen perustaminen
- leikkauspohjan vahvistaminen
- tärinähaittojen lieventäminen

*Stabiloinnin käyttökohteista selvästi yleisin on tie- ja katupenkereiden perustaminen. Perinteisesti on etenkin alle 2,5 m korkeita penkereitä on perustettu kimmoisia pilareita käyttäen. Kun käytettävät pilarilujuudet ovat kasvaneet, menetelmän käyttöalue on laajentunut korkeampiinkin penkereisiin. Pilaroinnilla parannetaan penkereen stabiliteettia ja yleensä käytännöllisesti katsoen estetään käyttövaiheen aikaiset painumat. Myötääviä pilareita, määrämittaisia pilareita tai pilareita, jotka ovat tässä ohjeessa esitettyä lujempia, on käytetty muutamissa kohteissa.*

*Pilarointia käytetään usein putkijohtojen perustamiseen sekä nauhamaisena perustusrakenteena että muuta tarkoitusta varten tehtävän pilarointikentän osana.*

*Pilarointia lyhyillä (esimerkiksi 2-3 m) pilareilla käytetään joskus pehmeän leikkauspohjan vahvistamiseen. Syyt ovat lähinnä työtekniset ja pilaroinnilla rajoitetaan pohjan häiriintymistä kaivutyön ja työkoneiden liikkumisen vaikutuksesta.*

*Pilarointia voidaan käyttää kevyiden kantavien rakenteiden perustamiseen. Tällaisia ovat alikulkukäytävät, porttaaliperustukset, pumppaamot jne. Yleensä pilaroinnille perustettavan rakenteen tulee olla staattisesti määrätty.*

*Pilarointia voidaan käyttää liikennetärinähaittojen lieventämiseen. Liikenneväylän pohjanvahvistuksena toimiva syvästabilointi lieventää tärinää. Tärinän leviämistä pehmeässä maaperässä voidaan myös rajoittaa liikenneväylän sivulle sijoitettavilla syvästabilointiseinämillä.*

### 3 Sideaineet

Sideaine sisältää yhtä tai useampaa stabiloivaa ainetta. Yleisimmät sideaineen komponentit ovat kalkki ja sementti, mutta myös muita stabiloivia aineita kuten kipsiä käytetään. Teollisuuden sivutuotteista on käytetty mm jauhettua masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Sideainetta voidaan kutsua seossideaineeksi, mikäli se sisältää useampaa kuin yhtä stabiloivaa ainetta.

**Sideaineen vaatimuksenmukaisuus eli materiaalin ominaisuuksien varmennus** osoitetaan ensisijaisesti CE-merkinnällä. Toissijaisesti vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa sideaineen valmistajan dokumenttien perusteella ja/tai rakennuspaikkakohtaisilla kokeilla kolmannen osapuolen valvonnassa.

Sementin vaatimuksenmukaisuus osoitetaan CE-merkinnällä.

Muiden sideainekomponenttien ja seossideaineen vaatimuksenmukaisuus osoitetaan sideaineen valmistajan dokumenttien perusteella ja/tai rakennuspaikkakohtaisilla kokeilla.

Kaikkien sideaineessa käytettyjen stabiloivien aineiden koostumus ilmoitetaan. Sideaineesta ilmoitetaan ympäristön kannalta merkittävien kemiallisten aineiden määrät. Kokeiden tulokset ja havainnot dokumentoidaan.

Haitallisten aineiden määrä selvitetään tarvittaessa Liikenneviraston ohjeen ”Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa”, TIEH 2100041-07 perusteella.

**Sideaineen kelpoisuus eli soveltuvuus käyttökohteeseen** selvitetään suunnittelussa.

Käytetään sellaista sideainetta, joka reagoi tunnetulla tavalla sekoitettavien maakerosten kanssa. Sideaineen soveltuvuus suunnittelukohteeseen osoitetaan laboratoriokokein ja tarvittaessa koestabiloinnilla.

Käytettävät stabilointiaineet eivät saa sellaisenaan, tai keskenään tai maaperässä olevien aineiden kanssa reagoidessaan aiheuttaa rakennuspaikalla tai sen ympäristössä pohjaveden tai maapohjan pilaantumista.

Sideaineen juoksevuuden tulee olla sellainen, että sideaineen tasainen syöttö on mahdollista.

Halutun vaikutuksen saavuttamiseen soveltuvan stabilointiaineen laadusta, vaikutuksen kehittymisajasta ja vaikutuksen pysyvyydestä varmistutaan riittävillä ennakkokokeilla. Niiden määrää ja laatua arvioitaessa voidaan käyttää hyväksi mahdollisia aikaisempia kokemuksia vastaavissa olosuhteissa.

Ennakkokokeet stabilointiaineiden teknisen käyttökelpoisuuden ja ympäristöturvallisuuden selvittämiseksi aloitetaan riittävän ajoissa, jotta muun muassa käytettävän aineen avulla saavutettavasta käsittelytehosta sekä lujuuden ja muiden ominaisuuksien kehitysnopeudesta saadaan luotettava kuva.

Ennakkokokeiden yhteydessä pyritään aina selvittämään myös käytettävän aineen ja käsittelytekniikan soveltuvuusalueen rajat ottaen huomioon, että rakennuspaikan pohjasuhteet voivat poikkeavat ennakkokokeiden aikana oletetuista olosuhteista.

**Käytettävä kalkki** on yleensä kovaksi poltettua sammuttamatonta kalkkia CaO. Kalkin aktiivinen CaO-pitoisuus on vähintään 75 %.

Stabilointiaineena käytettävä poltettu kalkki on hienojakoista, rakeisuudeltaan 0/0,2 siten, että vähintään 80 % läpäisee seulakoon 0,2 mm ja enimmäisraekoko on < 1 mm.

Jos aktiivisen CaO:n määrä alittaa 75 %, lisätään suunnitelma-asiakirjoissa osoitettua kalkkimäärää vastaavasti, Seossideaineessa pidetään tällöin muiden stabiloivien komponenttien määrä suunnitelman mukaisena. Työ- ja laatusuunnitelmassa kalkin oletetaan yleensä olevan 100-prosenttisesti aktiivista CaO:ta, mikä on otettava huomioon suhteutuksessa. Toimitetussa kalkissa aktiivinen CaO:n määrä on yleensä 75 %.

## 4 Pilaristabiloinnin mitoituksen lähtötiedot

### 4.1 Pohjatutkimukset

Pilarien tavoitetason määrittämiseen tarvittavat pohjatutkimukset vaihtelevat huomattavasti mm. seuraavissa eri tapauksissa:

- Pilarit ulotetaan selväpiirteiseen maakerrosrajaan (esimerkiksi savi/moreeni).
- Pilarit ulotetaan maakerrosrajaan, jonka toteaminen rakentamisvaiheessa on vaikeampaa (esimerkiksi savi/siltti).
- Pilarit tehdään määrämittäisinä ja niiden alle jää painuvaa maata.

Kun pilarit ulotetaan selväpiirteiseen ja toteutusvaiheessa selkeästi todettavaan maalajirajaan (esimerkiksi saven ja moreenin rajaan), pilaripituuden määrittämiseen riittävät painokairaukset. Jos pilarien alle jätetään jokseenkin painumatonta silttiä tai ylikonsolidoitunutta savea, pilarien tavoitetaso on määritettävä tiheämmin ja tarkemmin tutkimuksin, sillä ko. maakerrosraja ei ole pilarointikoneen sekoitinkärjellä todettavissa. Painokairausten tueksi pilarien alapään tason määrittämisessä tarvitaan tällöin myös näytteitä ja/tai CPTU-kairauksia.

Kun pilareiden alle jätetään painuvia maakerroksia, ko. kerrosten maalajit ja niiden vaihtelut on tutkittava sekä CPTU-kairauksin että näytteenotolla.

Stabiloitavien maakerrosten rakeisuus, humuspitoisuus, vesipitoisuus ja hienousluku on selvitettävä, jotta voidaan:

- alustavasti valikoida sopivimpia sideaineita
- valita edustavat kohdat stabiloinnin laboratoriotutkimuksille ja maastossa tehtäville koestabiloinneille
- arvioida stabiloinnin laboratoriotutkimusten ja maastossa tehtävien koestabilointien alueellista edustavuutta.

Maapohjan lujuusominaisuudet on selvitettävä.

*Maapohjan lujuusominaisuudet määritetään useimmiten siipikairauksin ja erikoistapauksissa kolmiaksaalikokein.*

Maapohjan painumaominaisuudet on selvitettävä ödometrikokein, joiden määräksi suositellaan:

- 1 piste/100–200 m tietä, kun kimmoiset pilarit ulotetaan painuvien maakerrosten alarajaan
- 1 piste/60–100 m tietä, kun painuvan kerroksen alarajaan ulottuvien pilarien suunnitellaan myötävään
- 1 piste/40–80 m tietä, kun pilarit suunnitellaan määrämittäisiksi ja ödometrikokeet keskitetään tällöin painuvien kerrosten alaosaan.

*Erityisesti määramittaisia pilareita varten tehdään mieluiten portaattaisia ödometrikokeita, jotta esikonsolidaatiojännitys  $\sigma_c$  saadaan mahdollisimman luotettavasti määritetyksi sekä myös sekundääripainumaparametrit voidaan määrittää.*

*Ödometrikokeiden tueksi ja niiden tarvittavaa määrää pienentämään suositellaan varsinkin määramittaisia pilarointeja varten tehtäviksi sähkövastusluotauksia, joilla voidaan määrittää savikerrostuman jatkuva vesipitoisuusprofiili.*

Pohjavedenpinta ja sen vaihtelut on selvitettävä.

Stabilointityötä mahdollisesti vaikeuttavat täytemaakerrokset on tutkittava kairauksin ja tarvittaessa koekuopin.

## 4.2 Stabiloidun maan mitoitusparametrien määrittäminen

Stabiloidun maan mitoitusparametrit voidaan määrittää:

- maastossa tehtävällä koestabiloinnilla
- laboratoriokokeilla
- samassa geologisessa muodostumassa tehtyjen aikaisempien stabilointien toteutum tiedoista.

Erityisesti alustavissa suunnitteluvaiheissa voidaan tukeutua lähiympäristön toteutumati etoihin. Tärkeää on kuitenkin tarkistaa, että savikerrosten indeksiominaisuudet vastaavat riittävästi toisiaan. Tällöin tulee kiinnittää huomiota varsinkin humuspitoisuuksien ja vesipitoisuuksien vastaavuuteen.

Sekä maastossa tehtävien koestabilointien että laboratoriokokeiden ohjelmointi aloitetaan määrittämällä selvitettävien asioiden tärkeysjärjestys ja kunkin selvittämiseen tarvittava vaihtoehtojen määrä esimerkiksi seuraavaan tapaan:

- sideaineen valinta
- sideaineen määrä
- työtekniset detaljit, kuten esimerkiksi sekoitinkärjen nostonopeus
- lujittumisaika.

*Koepilarin halkaisija ja muut tutkittavan asian kannalta vähäiset tekijät pidetään kokeessa vakioina. Oleellista on myös jo alkuvaiheessa valita koestusmenetelmät ja havaintojen tarvittava määrä, jotta hajonnan vaikutus ei pilaa tulosten tulkintaa. Yleensä samanlaisiksi tarkoitetuista pilareista tulisi koestaa samalla tavalla vähintään neljä kappaletta. Laboratoriossa voi kolme rinnakkaisnäytettä olla riittävä määrä. Varsinkin maastossa tehtävässä koestabiloinnissa suurin osa kustannuksista syntyy vasta koestusvaiheessa eikä koepilarien määrää pidä mitoittaa liian niukaksi.*

*Stabiloinnin lujuustavoite arvioidaan ainakin suuntaa-antavasti jo stabilointikokeiden ohjelmointivaiheessa. Yleensä stabiloidun maan leikkauslujuudeksi pitää saada vähintään noin 70 kPa, jotta stabilointiratkaisu olisi taloudellisesti kilpailukykyinen. Matalien (alle 2,5–3 m) penkereiden perustamisessa leikkauslujuus-*

*tavoite on useimmiten noin 80–120 kPa ja korkeammilla penkereillä 120–200 kPa. Kokeiltavat sideaineet ja sideainemäärät valitaan kokemukseräisesti alustavan lujuustavoitteen ja maakerrosten indeksiominaisuuksien (rakeisuus, vesipitoisuus, humuspitoisuus, rikkipitoisuus) mukaan. Maastossa tehtävien koestabilointien ohjelmoinnissa käytetään hyväksi stabiloitujen maanäytteiden laboratoriokokeiden tuloksia, mikä helpottaa ohjelmointia.*

Maastossa tehtävät koepilarit koestetaan yleensä useammalla eri menetelmällä. Jos käytetään vain yhtä menetelmää, on sen oltava pilarikairaus, ellei pilarin suuri lujuus tee pilarikairauksesta soveltumattomaksi. Pilareista otettavat näytteet antavat usein harhaanjohtavan kuvan pilarin lujuudesta: joko liian huonon tai liian hyvän. Näytteenottoa voidaan näin ollen käyttää vain muita menetelmiä täydentävänä tietona.

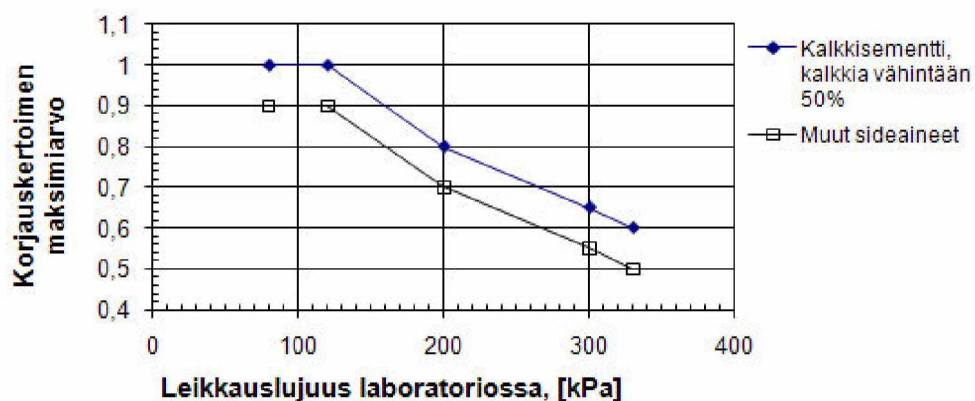
Laboratoriossa tehtävistä koekappaleista määritetään aina vähintään puristuslujuus sekä muodonmuutosmoduuli E. Merkittävässä kohteissa on suositeltavaa määrittää stabiloidun maan lujuusparametrit ja muodonmuutosominaisuudet kolmiaksisiaaliko-keilla, jotka jäljittelevät maassa vallitsevaa kuormitustilannetta sekä pilarissa tapahtuvia muodonmuutoksia paremmin kuin yksiaksisiaalinen puristuskoe.

*Luotettavimmat lähtötiedot pilarien lujuuden osalta saadaan hankekohtaisella maastossa tehtävällä koestabiloinnilla. Tämä on usein taloudellisesti edullista pienehköissäkin stabilointikohteissa.*

Laboratoriokokeilla saatu leikkauslujuuden arvo tulee kertoa korjauskertoimella, jonka maksimiarvot on esitetty kuvassa 1.

Laboratoriolujuutta voidaan sellaisenaan ilman korjauskerrointa käyttää mitoituslujuutena vain silloin, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

- pilarien leikkauslujuustavoite on alle 120 kPa ja
- sideaineena käytetään kalkkisementtiä, jossa kalkin osuus on vähintään 50 % ja
- sideainemäärää korotetaan 10 % laboratoriossa käytetystä.



Kuva 1. Laboratoriolujuuden korjauskertoimen maksimiarvo.

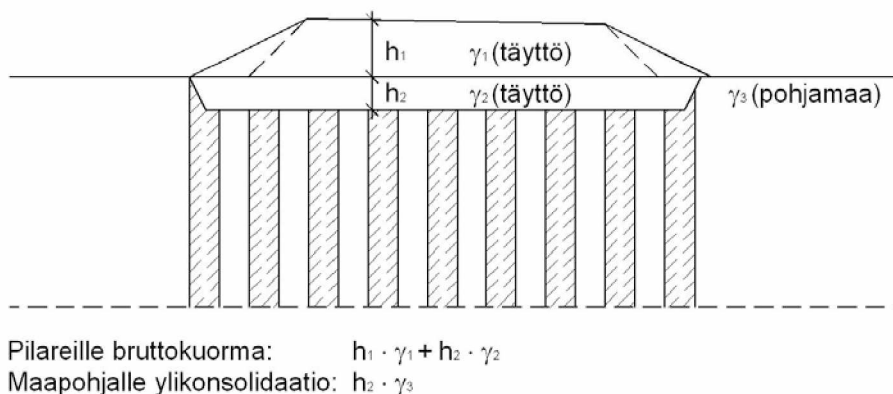
Tärkeää on varmistaa koestabiloinnin edustavuus sikäli, ettei tuloksia käytetä stabiloinnin mitoittamiseen kohdilla, joissa maakerrosten humuspitoisuus on suurempi kuin koekohdalla.

## 4.3 Kuormitusotaksumat

Maakerrosten tilavuuspainot määritetään ohjeen Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet TIEH 2100002-01 mukaisesti.

Liikennekuormana käytetään vakavuustarkasteluissa 10 kPa. Kimmoisten pilarien myötörajatilataarkastelussa käytetään 10 kPa liikennekuormaa, jonka oletetaan siirtyvän kokonaisuudessaan pilareille. Painumamitoituksessa liikennekuormaa ei oteta huomioon minkään pilarityypin osalta. Erikseen harkittaessa käytetään suurempia kuormituksia esimerkiksi raskaiden kuljetusten väylillä tai työnaikaisissa tilanteissa, kun käytetään raskaita työkoneita.

Penkereen massa vaikuttaa kuormana stabiloituun pohjamaahan aina täysimääräisesti. Penkereestä pohjamaahan kohdistuvaa kuormaa ei saa vähentää, vaikka luonnollista maanpintaa leikattaisiinkin tai olemassa oleva painumaton penger poistettaisiin ennen stabilointia. Määritettäessä pengerkuormituksen jakautumista pilareille ja maalle käytetään maalle ylikonsolidoituneen alueen muodonmuutosmoduuleja, jos maalle tuleva kuormituksenosa on pienempi kuin poistettavan maakerroksen paino ja poistettava maakerros on ehtinyt konsolidoida maapohjan. Tätä havainnollistaa kuva 2.



Kuva 2. Pilareille tulevan kuorman laskentaperiaate.

Pohjavedenpinnan mahdollinen aleneminen on otettava huomioon kuormituksena. Maapohjalle siirtyvän kuormaosan kautta myös pilariin kohdistuva sivutuki lisääntyy ja tämä voidaan ottaa huomioon pilarin kapasiteettia laskettaessa, ks. kaava 11.

## 4.4 Rakentamisen reunaehdot

Stabilointi mitoitetaan useimmiten 1-3 kuukauden lujittumisajalle ja 1 kk lujittumisajaksi on tavallisin valinta. Lujittumisajan valinnassa puntaroidaan, kummalla on suurempi merkitys, hiukan suuremmalla mitoituslujuudella vai nopealla rakentamisella.



Kimmoisan pilaroinnin tapauksessa penkereen annetaan olla täydessä korkeudessaan pilarien lujittumisajan jälkeen vähintään 1 kk ajan ennen tien päällystämistä. Tässä ajassa ehtii kimmoisien pilarien pieni painuma useimmiten tapahtua. Jos esimerkiksi korjauskohteissa tarvitaan nopeampaa rakentamista, on tapauskohtaisesti harkittava mm. seuraavia vaihtoehtoja:

- hiekasta, sorasta tai murskeesta tehdyn paksuhkon työalustan käyttö, jolloin pilareille saadaan heti alusta asti tiivistävää ja lujittumista edistävää kuormaa
- pilaroinnin lievä ylimeritoitus
- pilarien toteutuneen lujuuden hyväksikäyttö, mikäli se ylittää tavoitelujuuden
- sen hyväksyminen, että myöhemmän päällystyksen yhteydessä korjataan pieniä painumia

Toisaalta pitempikin seisona-aika kuin 1kk on hyvä varmistus, varsinkin jos pilarointi on harva tai pilarit ovat pitkiä tai pilaroinnin lopputuloksen tasalaatuisuudesta on epäilystä.

*Pilarien kuormittaminen jo lujittumisaikana, kuitenkin lopullista pienemmällä kuormalla, on yleensä pilarien lujittumisen kannalta vain hyväksi. Jos kyseessä on määrämittäinen pilarointi, varhaisessa vaiheessa tapahtuva kuormitus saattaa olla haitallista, jos pohjamaa on häiriintyneessä tilassa pilarien alapuolella.*

Vakavuuden kannalta kriittisissä tilanteissa, kuten esimerkiksi sivukaltevassa maastossa taikka erityisen häiriintymisherkän saven ollessa kyseessä, on tarkistettava, yleensä siipikairauksin, että pilarien välisen saven lujuus on ehtinyt palautua työnäikaisen häiriintymisen jälkeen. Tämä saattaa ainakin joissain tapauksissa viedä enemmän aikaa kuin pilarien lujittuminen.

*Laajoissa ja ajallisesti eri jaksoihin jakautuvissa stabilointitöissä voi olla mahdollista tarkistaa mitoitus ensiksi tehtyjen stabilointien toteutumatietojen pohjalta.*

## 5 Pilaristabiloinnin mitoitus

### 5.1 Pilaristabiloidun maarakenteen vakavuus

#### 5.1.1 Erilaiset kohteet ja vaatimukset

Kaikissa stabilointikohteissa on tarkistettava maarakenteen vakavuus sekä ilman stabilointia että stabilointi huomioonottaen. Ensin mainittu laskelma vaikuttaa siihen, missä määrin stabiliteetti on merkitsevä tekijä stabiloinnin mitoituksessa. Vakavuus ilman stabilointia lasketaan yleensä ympyräliukupintamenetelmällä ja laskelmassa otetaan huomioon penkereen tai leikkauksen muoto mahdollisine vastapenkereineen ja kevennysleikkauksineen sekä mahdolliset pengerkevennykset tai massanvaihdot. Esimerkiksi geovahvisteet jätetään tässä tarkastelussa huomiotta.

Vakavuus ilman stabilointia vaikuttaa siihen, kuinka pilarien ja maan voidaan olettaa toimivan yhdessä.

Pilarit on asetettava yhtenäisiksi pengerluiskaa vastaan kohtisuoriksi rakenteiksi:

- kun kysymyksessä on penger tasaisessa maastossa ja kokonaisvarmuus ilman liikennekuormaa ja maan kestävyuden ominaisarvolla laskettaessa on alle 1,0 tai kun kysymyksessä on meluvalli ja kokonaisvarmuus ilman liikennekuormaa ja maan kestävyuden ominaisarvolla laskettaessa on alle 0,9.
- kun kysymyksessä on penkereen ja kaivantoluiskan (tai yli 1 m syvän ojan) yhdistelmä tai penger kaltevassa (yli 1:20) maastossa ja kokonaisvarmuus ilman liikennekuormaa ja maan kestävyuden ominaisarvolla laskettaessa on alle 1,2, tai kun kysymyksessä on meluvalli ja kokonaisvarmuus maan kestävyuden ominaisarvolla laskettaessa on alle 1,1.
- kun kysymyksessä on kaivanto- tai leikkausluiska

Lähtötilanteen vakavuutta voidaan tarvittaessa parantaa pengerluiskan loiventamisella tai vastapenkereellä.

Lähtötilanteen vakavuusvaatimuksesta voidaan tarkan harkinnan mukaan tapauskohtaisesti joustaa seuraavilla perusteilla:

- Suunnittelu perustuu erityisen hyviin lähtötietoihin (erityisesti maastossa tehtyyn koestabilointiin)
- tai stabiloinnin onnistuminen varmistetaan tavanomaista varmemmin.

### 5.1.2 Vakavuus- ja siirtymätarkastelut

Varmuus stabiloidun rakenteen sortumaa vastaan käsitellään eurokoodijärjestelmän mukaan (kappale 1.3). Kuormitusotaksumat on esitetty kohdassa 4.3. Vakavuuslaskennassa käytettävät varmuusluvut on esitetty Liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodiin 7 laatimassa kansallisessa liitteessä. Näitä varmuuslukuja käyttämällä saavutetaan rakenteen riittävä vakavuus.

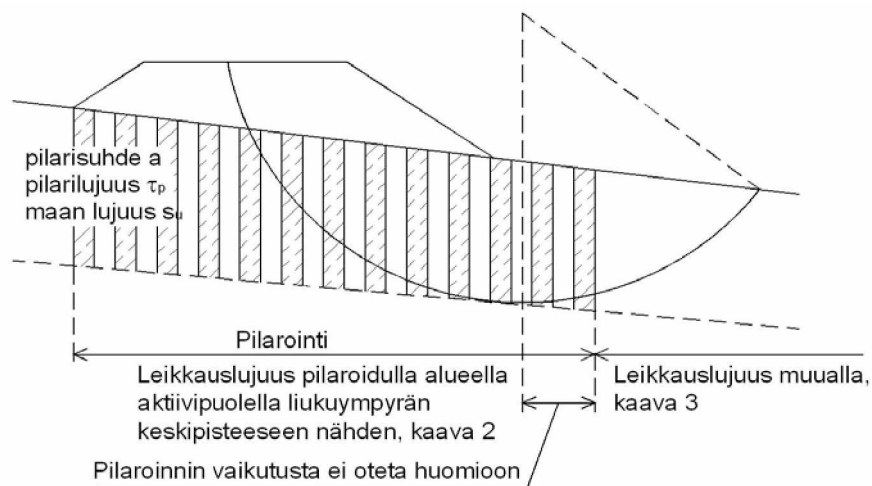
Jotta penkereen, luiskien ja tiehen liittyvien ja lähialueella sijaitsevien rakenteiden siirtymät voidaan hallita, suoritetaan vakavuuden laskenta myös käyttäen normaalien osavarmuuslukujen lisäksi korotettuja maan osavarmuuslukuja, jotka on esitetty Liikenneviraston soveltamisohjeessa taulukossa 5.1 'Käyttörajatilatarkastelussa käytettävät maapohjan lujuusparametrien osavarmuusluvut stabiliteetin laskentaan, kun tarkastellaan maapohjan siirtymiä'. Mikäli stabiloitu alue rajautuu siltaan, tukimuuriin tms. rakenteeseen tai tiealueen ulkopuolella sijaitsevaan rakennukseen tms, johon ei saa aiheutua kuormituksia maamassojen liikkeestä, lasketaan vakavuus käyttäen taulukossa annettuja suurempia osavarmuuslukuja. Muissa tapauksissa laskenta tehdään käyttäen taulukossa annettuja pienempiä osavarmuuslukuja. Jos maakerrosten humuspitoisuus ylittää 6 %, ei soveltamisohjeessa mainittu varmuustaso välttämättä riitä riittävään siirtymien vähentämiseen vaan varmuustason tulisi olla vielä korkeampi kuin mitä em. taulukossa on vaadittu.

Jos maanpinta on tasainen, pilaroinnin mitoittaminen kimmoisana johtaa useimmiten selvästi minimivaatimusta suurempaan varmuustasoon.

Stabiloidun rakenteen vakavuustarkasteluissa otetaan huomioon pilarien sijainti liukuympyrän keskipisteeseen nähden, sillä liukupinnan passiivipuolella oleville pilareille tulee lähinnä sivusuuntaisia kuormia, joita pilarin kaltainen hauras materiaali varsin heikosti kestää.

Yksinkertaisin vyöhykejakotapa on keskimääräiseen leikkauslujuuteen perustuva menetelmä sillä korjauksella, että kaikkien liukuympyrän keskipisteeseen nähden passiivipuolella olevien pilareiden vaikutus jätetään huomiotta, ks. kuva 3.

*Laskelmassa huomioonotettavan pilaroidun vyöhykkeen leveys vaihtelee liukupintakohtaisesti mutta suuntaa-antava mitoitus kannattaa tehdä aluksi ottaen huomioon koko pilarointi.*



Kuva 3. Vakavuuslaskenta leikkauslujuuden painotetun keskiarvon mukaisella menetelmällä sillä korjauksella, että passiivipuolen pilarien vaikutusta ei oteta huomioon.

Maan keskimääräinen leikkauslujuus pilaroidulla alueella aktiivipuolella liukuympyrän keskipisteeseen nähden:

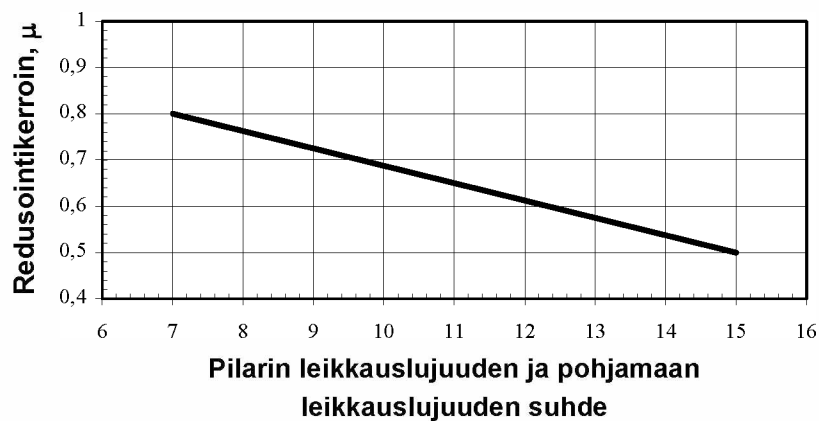
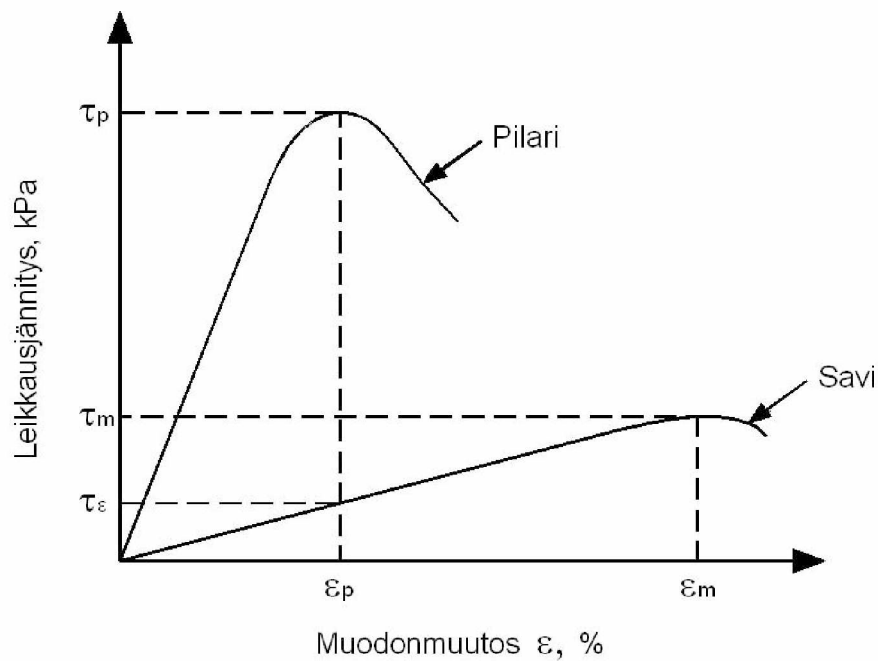
$$s_{ua} = a \cdot \tau_{pil} + (1 - a) \cdot \mu \cdot s_u \quad (2)$$

$s_{ua}$  pilaroidun maan keskimääräinen leikkauslujuus aktiivipuolella  
 $a$  pilarisuhde, ks. kaava 6  
 $\tau_{pil}$  pilarin leikkauslujuus  
 $s_u$  pohjamaan leikkauslujuus  
 $\mu$  redusointikerroin, ks. kuva 4 (lisäksi siipikairauslujuuden mahdollinen redusointi  $w_{L:n}$  perusteella)

Maan leikkauslujuus pilaroimattomalla alueella sekä pilaroidun vyöhykkeen passiiviosalla:

$$s_{up} = \mu \cdot s_u \quad (3)$$

$s_{up}$  maan leikkauslujuus pilaroimattomalla alueella ja passiivipuolella  
 $s_u$  pohjamaan leikkauslujuus  
 $\mu$  redusointikerroin, ks. kuva 4 (lisäksi siipikairauslujuuden mahdollinen redusointi  $w_{L:n}$  perusteella)



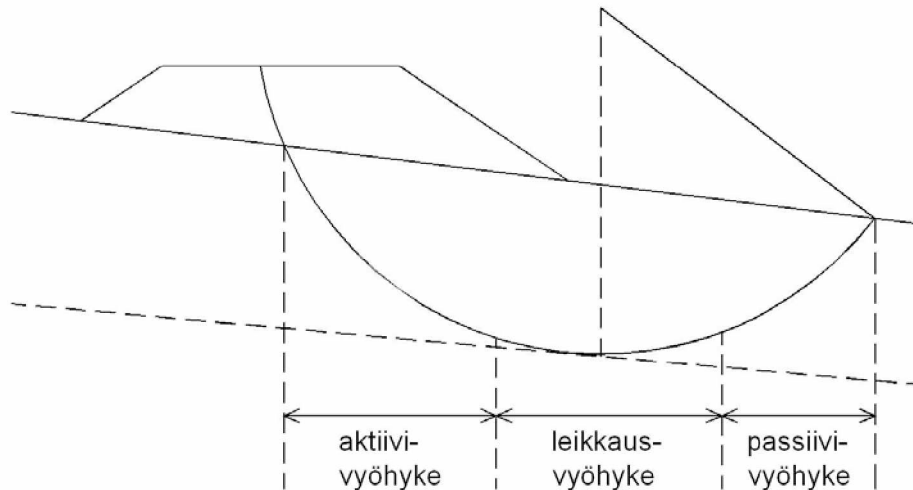
Kuva 4. Kuvassa 3 ja kaavoissa 2-3 esitetyn redusointikertoimen  $\mu$  riippuvuus pilarin ja pohjamaan leikkauslujuuksien suhteesta (ylemmässä kuvassa tämän perustelu pilarin ja saven leikkausjännityksen erilaisella mobiilisoitumisella). Tämän lisäksi tehdään siipikairalujuuden redusointi juoksurajan  $w_L$  (tai hienousluvun  $F$ ) perusteella.

Tarkempi vyöhykejako on seuraavassa, varsinkin Ruotsissa käytetyssä, menetelmässä, ks. kuva 5:

- Pilarin leikkauslujuus lasketaan  $c'\phi'$ -menetelmällä.
- Pilarin koheesion suurin mahdollinen ominaisarvo on 100 kPa ja se kerrotaan aktiivivyöhykkeessä kertoimella 0,3, leikkausvyöhykkeessä kertoimella 0,1 ja passiivivyöhykkeessä kertoimella 0.

*Pilarin koheesion ominaisarvoksi voidaan valita esimerkiksi laboratoriokokein tai kairauksin määritetty suljetun leikkauslujuuden arvo.*

- Pilarin kitkakulmana voidaan käyttää kalkkipilareilla  $30^\circ$  ja kalkkisementtipilareilla  $35^\circ$ .
- Stabiloimattomalle maalle käytetään normaaleja  $c'\phi'$ -arvoja.
- Laskelmissa käytettävät huokosvedenpaineet määritetään kulloisenkin kuormitustilanteen mukaisesti.



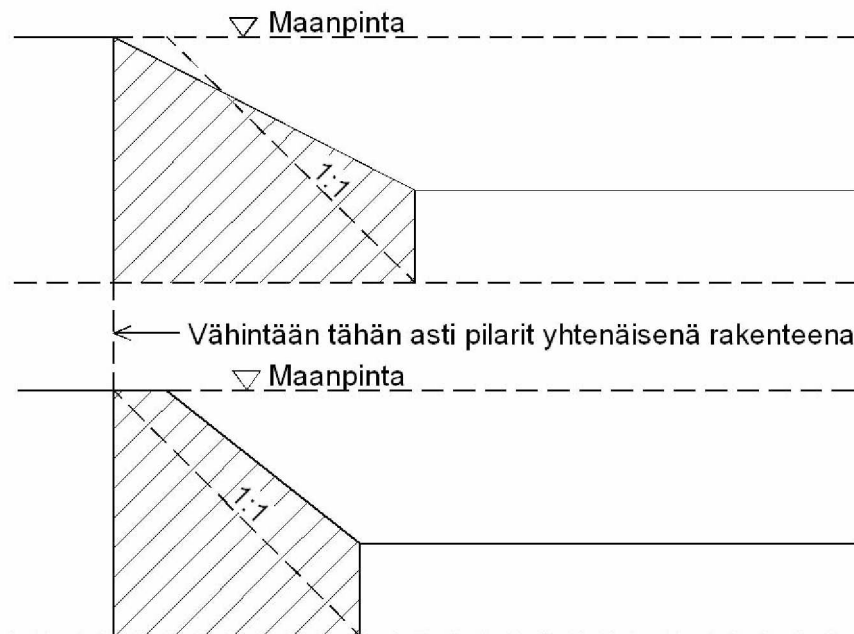
Kuva 5. Ruotsissa käytetty /Björkman, Ryding/ vyöhykejako vakavuuslaskelmas-  
sa. Aktiivivyöhykkeessä pilareihin kohdistuu lähinnä puristusta, leikka-  
usvyöhykkeessä leikkausta ja passiivivyöhykkeessä vetoa. Vyöhykkeiden  
rajat riippuvat jonkin verran penkereen geometriasta ja maakerrosra-  
kenteesta.

### 5.1.3 Lamellirakenteiden mitoitus

Kun pilareista muodostetaan yhtenäisiä luiskaa vastaan kohtisuoria lamellirakenteita, niiden vakavuusmitoituksessa voidaan toisissaan kiinni oleville pilareille käyttää täyt-  
tä lujuutta myös passiivipuolella. Tällöin ei kuitenkaan maan leikkauslujuutta oteta  
huomioon.

Lamellirakenteiden tarvittava minimilaajuus määritetään kuvan 6 mukaan.

Yhtenäisten lamellirakenteiden pilarit tulee sijoittaa niin, ettei niiden väliin jää raken-  
teen toimintaa heikentäviä rakoja. Pilarit tulee tällöin suunnitella aina vähintään 50  
mm toisiaan leikkaaviksi. Pitkillä (yli 10 m) pilareilla tai muuten vaativissa olosuh-  
teissa pilarit tulee suunnitella leikkaamaan toisiaan enemmänkin.



Kuva 6. Pilareista muodostettavien yhtenäisten lamellirakenteiden vähimmäislaajuusvaatimuksia kaivanto- tai leikkausluiskatapauksissa.

Pilarilamelleja käytetään usein myös tukiseinällä tuettujen kaivantojen seinien alapäiden tuennassa.

## 5.2 Penger kimmoisille pilareille

### 5.2.1 Kimmoisen pilaroinnin mitoitusperiaatteet

Syvästabiloitu pengerrakenne ymmärretään pohjanvahvistukseksi. Tämän edellytyksenä on kohtuullinen tavoitelujuus (pilarin leikkauslujuus korkeintaan 200 kPa) ja riittävän matala pilarin ja maan tavoitteellinen lujuussuhde (korkeintaan 15). Rakenteen vakavuus varmistetaan normaalein liukupintalaskelmin käyttäen eurokoodijärjestelmän avulla laskettuja mitoitusarvoja.

Kimmoisan pilaroinnin mitoituksessa kuorma jakautuu pilareille ja maalle kohdassa 5.2.2 esitettyjä periaatteita noudattaen. Pilarin kantavuus varmistetaan siten, että pilarille tuleva kuorma (ominaiskuorma) määritetään myötökuorman suuruiseksi kuitenkin niin, että se on enintään 70 % murtokuormasta.

Pilarin myötörajaolettamus perustuu toisaalta kuormitus-muodonmuutos-käyrän muotoon, joka on materiaalikohtainen, ja toisaalta johtaa varsin hyvään todennäköisyyteen, että erittäin harva yksittäinenkään pilari murtuu. Yksittäisten harvojen pilareiden kuormittuminen myötörajan yli ei käytännössä tee ko. pilareista toimimattomia eikä vaaranna syvästabiloidun maapohjan toimintaa.

Kimmoiselle pilarille asetettavat vaatimukset ovat:

- Pilarin mitoituslujuus ei ylitä 15-kertaista pohjamaan lujuutta. Tällöin tarkastellaan pilarin mitoituslujuutta ja pystysuunnassa 2 m matkalla laskettua maan lujuuden keskiarvoa.
- Penkereen vakavuus ilman pilarointia tarkistetaan ja pilarien mahdollinen asettaminen yhtenäisiksi rakenteiksi tarkistetaan kohdan 5.1 mukaan.
- Sideaine on kalkkisementtiä tai muuta ominaisuuksiltaan tunnettua, ks. luku 3.

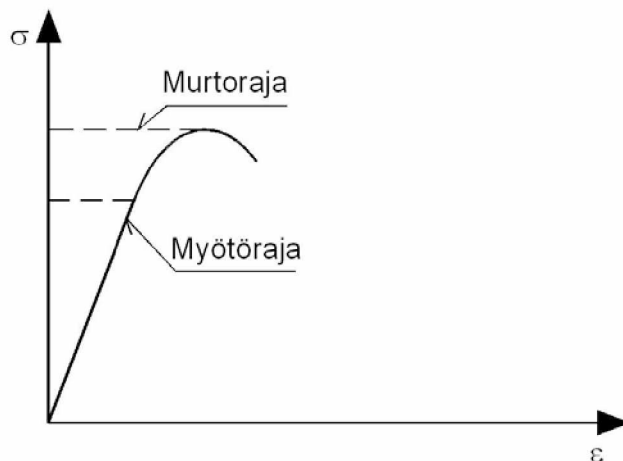
*Teoreettisesti oikeampaa olisi tarkastella pilarin ja maan lujuussuhteen sijasta muodonmuutosmoduulien suhdetta, mutta molempien moduulien määrittämisessä on epätarkkuuksia ja tulkintavaikeuksia, joten käytännön suunnittelussa lujuus ovat käyttökelpoisempi.*

*Pilareille perustetun rakenteen painumaa tarkasteltaessa pitää selkeästi erottaa kolme luonteeltaan ja nopeudeltaan täysin erilaista painumalajia:*

- *Pilarien painuma kuormitettaessa niitä alle myötörajan. Painuma tapahtuu välittömästi eikä sillä ole merkitystä esimerkiksi tiepenkereen käytönaikaista painumattomuutta arvioitaessa.*
- *Pilarien välisen maan konsolidaatiopainumat silloin, kun pilarien myötökuorma ylitetään.*
- *Määrämittaisten pilarien alapuolisen maan konsolidaatiopainumat.*

### 5.2.2 Kimmoisen pilaroinnin painumamitoitus

Kimmoisan pilaroinnin mitoituksessa määritetään kuorman jakautuminen pilarin ja maan kesken sekä verrataan pilarille tulevaa kuormaa myötörajan suuruiseen sallittuun kuormaan (kuva 7). Murtokuorman ja sen perusteella laskettavan myötökuorman määrittämisessä otetaan huomioon ympäröivän maan antama sivutuki.



Kuva 7. Kimmoisen pilarin kuormitus-muodonmuutos -käyrä. Kimmoisan pilarin mitoitus perustuu siihen, että pilarin kuormitus ei ylitä myötörajaa (70 % murtolujuudesta).



Kuormitusten jakautuminen pilarien ja maan välillä riippuu pilarien ja maan muodonmuutosmoduulien suhteesta. Maan ja pilarin oletetaan painuvan yhtä paljon. Menetelmä perustuu Bromsin ja Bomanin (1977) esittämään tasaisen painuman periaatteeseen. Tarkastelu on iteratiivinen.

*Painuman laskeminen aloitetaan tekemällä aluksi laskentatekninen oletus pilarivälin ja kuormajakautuman suuruusluokasta (pilarien ja maan osuus kuormasta):*

- Käyttökelpoinen alkuoletus kuormituksen jakautumisesta pilareille ja maalle on yleensä se, että pilarit kantavat 90 % kokonaiskuormasta, jolloin maalle jää 10 % kuormasta.

Pilarien painuma lasketaan kaavalla 4 kaavaa 5 apuna käyttäen.

$$s_{pil} = \frac{\Delta h \cdot q_{pil}}{a \cdot E_{pil}} \quad (4)$$

$\Delta h$  on pilarin pituus  
 $s_{pil}$  pilariin siirtyvän kuormaosuuden aiheuttama painuma  
 $q_{pil}$  pilareille tuleva osa kokonaiskuormasta  $q_0$  (ei liikennekuormaa)  
 $a$  pilarien suhteellinen pinta-ala, ks. kaava 6  
 $E_{pil}$  pilarien muodonmuutosmoduuli

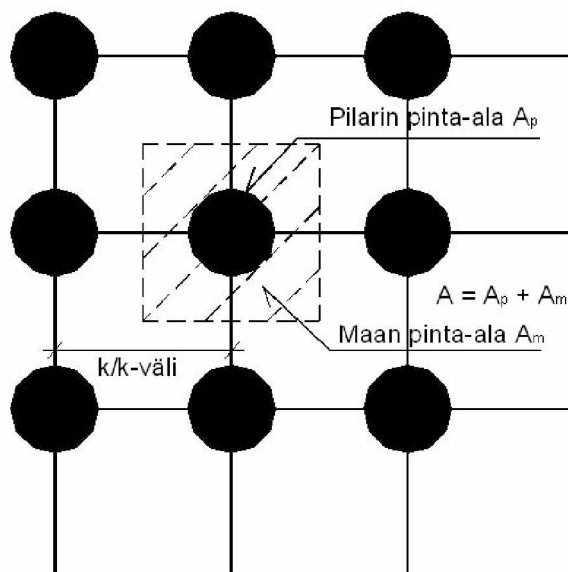
Pilarin muodonmuutosmoduulin voidaan olettaa olevan kaavan (5) mukainen.

$$E_{pil} = 20 \cdot c_{krit}^{1,6} \quad (5)$$

$E_{pil}$  on pilarien muodonmuutosmoduuli  
 $c_{krit}$  pilarin kriittinen leikkausjännitys eli myötörajaa vastaava leikkausjännitys eli 70 % pilarin leikkauslujuudesta (pilarin leikkauslujuutena käytetään joko pilarista mitattua leikkauslujuutta taikka laboratoriossa määritettyä jäännöslujuutta)

$$a = \frac{A_p}{A_p + A_m} \quad (6)$$

$a$  on pilarien suhteellinen pinta-ala  
 $A_p$  pilarin pinta-ala  
 $A_m$  maan pinta-ala, ks. kuva 8



Kuva 8. Pinta-alojen  $A_p$ ,  $A_m$  ja  $A$  määrittäminen.

Maan painuma yksinkertaisimmassa laskentatapauksessa (homogeeninen normaali-konsolidoitunut pohjamaa) voidaan laskea kaavalla 7 käyttäen hyväksi kaavoja 8 ja 9. Koska maa ja piliari painuvat yhtä paljon, voidaan maalle siirtyvä kuormitus laskea kaavalla 9.

$$s_{\text{maa}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{maa}}}{(1 - a) \cdot M} \quad (7)$$

$\Delta h$  on pilaroidun maakerroksen paksuus  
 $s_{\text{maa}}$  maalle siirtyvän kuormaosuuden aiheuttama painuma  
 $q_{\text{maa}}$  maalle tuleva osa kokonaiskuormasta  $q_0$   
 $a$  pilarien suhteellinen pinta-ala, ks. kaava 6  
 $M$  kokoonpuristuvuusmoduuli

$$M = m \cdot 100 \cdot \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{1-\beta} \quad (8)$$

$m$  on moduuliluku  
 $\beta$  jännityseksponentti  
 $\sigma$  maassa vallitseva pystyjännitys

$$q_{\text{maa}} = \left( \frac{(1 - a) \cdot M}{a \cdot E_{\text{pil}} + (1 - a) \cdot M} \right) \cdot q_0 \quad (9)$$

Painuman laskemisen jälkeen tarkistetaan pilarijännityksen suhde pilarin myötörajaan. Ensiksi lasketaan pilariille tuleva kuormitus kaavalla 10. Liikennekuorma otetaan tässä tarkastelussa huomioon.

$$\sigma_{pil} = \frac{q_0 - q_{maa}}{a} + \frac{q_{liik}}{a} \quad (10)$$

$\sigma_{pil}$  on pilarille tuleva puristusjännitys (tarkastelutaso penkereen ja maanpinnan rajapinta)

$q_{liik}$  tasainen liikennekuorma (10 kPa)

Kaavalla 10 määritetty puristusjännitys  $\sigma_{pil}$  edustaa pilarin puristusjännityksen maksimiarvoa. Kun penkereen alla on kuivakuori, kuormitus siirtyy maanpinnassa pääosin maapohjalle, ja pilarijännityksen voidaan olettaa olevan maksimissaan ( $= \sigma_{pil}$ ) kuiva-kuoren alapinnassa, jota käytetään tarkastelusyvytyenä.

*Tarkemman laskennallisen tarkastelun perusteella (esimerkiksi elementtime-netelmää käyttäen) voidaan valita muukin taso. Asiaa on käsitellyt mm Nikkinen julkaisussa Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta.*

Jos pilareiden ja penkereen välissä käytetään lujitteita, tarkastelusyvyys on kussakin tapauksessa valittava erillisen tarkastelun perusteella, koska lujitteet tehostavat kuormien keskittymistä pilareille.

Pilarin puristuskapasiteetti koostuu pilarin omasta leikkauslujuudesta ja ympäröivän saven antamasta sivutuesta kaavan 11 mukaisesti. Pilarin sivutuki lasketaan kaavalla 12 ja sen suuruus riippuu valittavasta tarkastelusyvytydestä. Tarkastelusyvytyden valinta on selostettu edellä.

$$\sigma_{murto} = 2 \cdot \tau_{pil} + k_h \cdot \sigma'_h \quad (11)$$

$\sigma_{murto}$  on pilarin puristuskapasiteetti

$\tau_{pil}$  pilarin leikkauslujuus

$k_h$  horisontaalijännityksen kerroin ( $=1$ )

$\sigma'_h$  pilareihin vaikuttava maan tehokas horisontaalijännitys

$$\sigma'_h = \sigma'_v + \frac{\Delta\sigma'}{2} \quad (12)$$

$\sigma'_v$  on maan pystysuora tehokas jännitys alkutilanteessa tarkastelusyvytydellä

$\Delta\sigma'$  kuormituslisäys (ilman liikennekuormaa)

Pilarille tulevaa puristusjännitystä (kaava 10) verrataan pilarin myötörajaan (kaava 13). Pilarijännitys saa olla korkeintaan myötöjännityksen suuruinen.

$$\sigma_{pil} \leq \sigma_{myötö} \leq 0,7 \cdot \sigma_{murto} \quad (13)$$

Kimmoisaa pilaria ei työnaikaisissa tilanteissa saa kuormittaa yli myötörajan. Sen sijaan pilarien kuormittaminen työn aikana senhetkistä myötörajaa kevyemmin on edullista pilarien lujittumiselle.

Stabiloidun rakenteen vakavuus on tarkistettava luvussa 5 esitetyillä menetelmillä.

*Yleensä vakavuus on kimmoisan pilaroinnin mitoituksessa määräävä vain, kun maanpinta on kalteva, penkereen vierellä on kaivantaja tai penger on korkea. Kun kysymyksessä on matalahko penger tasaisessa maastossa, kimmoisaksi mitoitettu pilarointi nostaa varmuustason sortumaa vastaan minimivaatimukset ylittäväksi.*

*Kimmoisan pilaroinnin mitoitus ei ole erityisen herkkä pohjamaan painumaparametrien epätarkkuuksille silloin, kun maa on normaalikonsolidoitunutta. Sen sijaan mahdollinen ylikonsolidaatio vaikuttaa mitoitukseen merkittävämmän. Ylikonsolidoitunut pohjamaa pystyy pienellä painumalla ottamaan vastaan selvästi enemmän kuormaa kuin normaalikonsolidoitunut maa, mikä pienentää pilareille tulevaa kuormitusta.*

## 5.3 Pilaritiheyden tarkistaminen

Yleensä pilarien k/k-väli on vähintään pilarin halkaisija + 0,2 m. Tiheämmille pilaroinneille ei ole teknisiä esteitä, mutta usein jokin muu ratkaisu on taloudellisempi.

Jos pilariväli on suuri, ei tasaisen painuman oletus (pilari ja maa painuvat yhtä paljon) päde vaan maa voi painua enemmän ja tämä voi heijastua myös tien pintaan. Eri-tyisesti kimmoisilla pilareilla kuormien riittävä siirtyminen pilareille on syytä varmistaa.

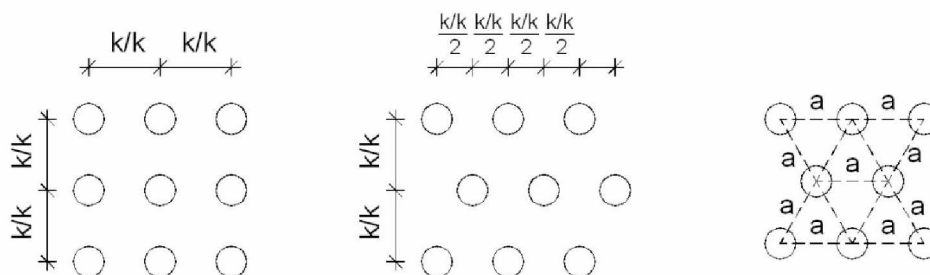
Tarkasteluita pilaritiheyden riittävydestä tarvitaan, jos laskettu pilariväli ylittää joko arvon pilarin halkaisija + 0,7 m tai pengerkorkeuden. Kuivakuorikerros siirtää tehokkaasti kuormia pilareille, joten em. laskutavalla saatua enimmäispilariväliä voidaan kasvattaa jokaista täyttä kuivakuoren 0,5 metrin paksuutta kohti 0,1 metriä, ei kuitenkaan enempää kuin 0,3 m. Kuivakuoren leikkauslujuuden tulee olla vähintään 30 kPa.

## 5.4 Pilarien keskinäinen sijoitus

Pilarit voidaan useimmissa tapauksissa sijoittaa yksinkertaiseen neliöverkkoon. Kolmioverkkojen yleistynyt käyttö pohjautunee analogiaan pystyojaverkoston kanssa ja siitä on hyötyä:

- erityisen harvoilla pilaroinneilla ja matalilla penkereillä, kun halutaan varmistaa kuormien mahdollisimman tehokas siirtyminen pilareille
- myötäävillä pilareilla painumien nopeuttamiseksi.

Erilaisia pilariverkkoja on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Pilarien sijoituskaavioita. Vasemmalla yksinkertainen neliöverkko (useimmiten aivan hyvä), keskellä neliöverkko, jossa joka toinen rivi aloitetaan "puolivälipisteestä" (pieni parannus erityisen harvoilla pilari-tiheyksillä), oikealla tasasivuinen kolmio (paras, mutta harvoin tarpeen). Oikeanpuoleista kaaviota käytettäessä tulee muistaa, että pilarivälin laskeminen neliön sivuna ja saman mitan käyttäminen tasasivuisen kolmion sivuna johtaisi 15 % ylimitoitukseen.

## 5.5 Putkijohtojen perustaminen syvästabiloinnille

Syvästabiloinnille perustettavien putkijohtojen kuormitusotaksumat on esitetty kuvassa 10.

Putkijohtojen alle tuleva pilarointi mitoitetaan kimmoisana. Sen lisäksi, että tarkistetaan pilarikuormien jäävän alle myötörajan, voidaan pilarointia joskus joutua tihentämään enemmänkin, jotta putkijohdon painuma saadaan pysymään sallituissa rajoissa. Kimmoisan pilaroinnin rakennusaikainen nopea painuma, joka on tie- tai katu-penkereelle tavallisesti merkityksetön, on otettava putkijohdon painumana huomioon.

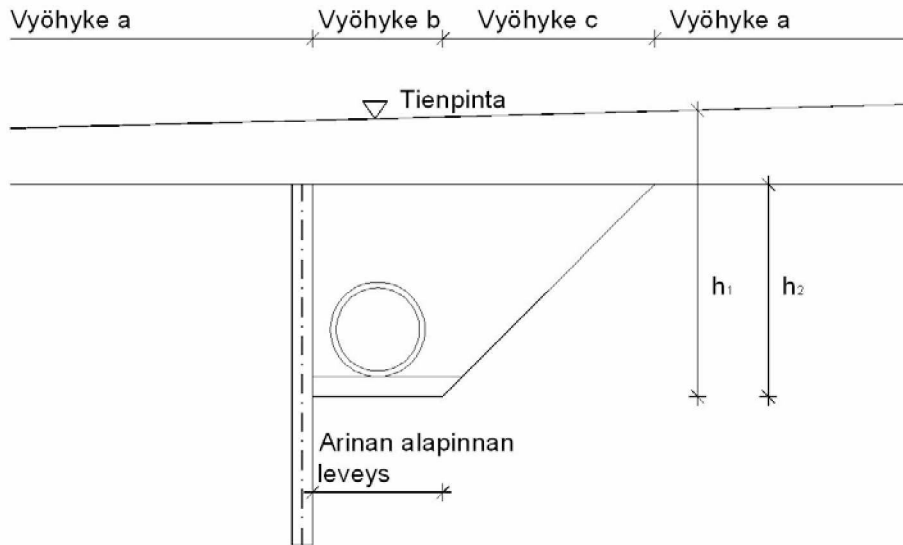
Jos putkijohto rakennetaan syvästabiloidun kohdan esikuormittamisen jälkeen, esikuormituksen aikaista painumaa ei tarvitse ottaa painumamitoituksessa huomioon ja pilaroinnin tihentämistarve putkijohdon kohdalla jää vähäiseksi.

- Vyöhyke a: Putkijohdolla ei vaikutusta pilaritiheyteen  
Vyöhyke b: Putkijohdon arinan alla tihennetty pilarointi  
Vyöhyke c: Jos vyöhykkeen leveys ylittää 3 m, harkitaan pilaroinnin tihennystarve vyöhykkeellä c tapauskohtaisesti

Vyöhykkeellä b pilareille tuleva kuorma lasketaan korkeuden  $h_1$  ja täytön tilavuuspainon mukaan. Lisäkuormana otetaan huomioon mahdollinen pohjaveden aleneminen. Jos putken halkaisija ylittää 1,0 m, putken tyhjä sisäosa voidaan ottaa huomioon kevennyksenä. Putken sisällä virtaavaa vettä ei oteta huomioon kuormituksena.

Vyöhykkeen b pilaroinnin painumamitoituksessa (kimmooisan pilaroinnin mitoitus) otetaan poiskaivettavan maan paino (korkeutta  $h_2$  vastaava) huomioon ylikonsolidat-tiona.

Vyöhykkeen b tihennettyyn pilarointiin lasketaan mukaan ne pilarit, joiden keskikohta osuu vyöhykkeelle b.



Kuva 10. Syvästabiloinnille perustettavan putkijohdon kuormitusotaksumat. Samassa kuvassa on esitetty sekä tuettu kaivanto (vasen puoli) että luis-kattu kaivanto (oikea puoli).

Joskus voidaan ponttiseinien alapään tuentaan käyttää poikittaisia pilarilamelleja, jotka voivat toimia myös putkijohdon perustamisen vaatimina pilaritihennyksinä.

Roudasta aiheutuvat siirtymäkiilat mitoitetaan ohjeen Tierakenteen suunnittelu TIEH 2100029-04 mukaan.

## 5.6 Määrämittaisen stabiloinnin mitoitus

### 5.6.1 Määrämittaisten pilarien käytön edellytykset

Tämän luvun ohjeita käytetään määrämittaisen stabiloinnin mitoituksessa silloin, kun pilareilla lisätään vakavuutta tai vähennetään painumia.

Määrämittainen pilarointi soveltuu parhaiten painumien rajoittamiseen sellaisissa kohteissa, joissa välittömästi kuivakuoren alapuolella sijaitsevat savikerrokset ovat painuman kannalta kriittisiä ja joissa savikerrosten kokonaispaksuus on suuri. Määrämittainen pilarointi ei sovellu kohteisiin, joissa pilaroinnin upotustason alle jää paksuudeltaan tai painumaominaisuuksiltaan pienipiirteisesti vaihtelevia savikerrok-sia. Siirtymärakenteiden suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Määrämittaisten pilarien alapuolelle ei saa jättää maakerroksia, joiden suljettu leik-kauslujuus alittaa 15 kPa tai vesipitoisuus ylittää 100 % taikka humuspitoisuus ylit-tää 2 %. Nämä vaatimukset eivät ole ehdottomia, kun kyseessä on suppea-alainen siirtymärakenne.

Määrämittaisten pilareiden mitoittavana leikkauslujuutena saa käyttää enintään arvoa 120 kPa. Jos lujitettavan kerroksen pienin leikkauslujuus on alle 12 kPa, saa pilarin leikkauslujuutena käyttää enintään kymmenkertaista maan leikkauslujuutta.

### 5.6.2 Stabiliateetti ja mitoitus pilariryhmänä

Perustettaessa tiepenger määrämittaista stabilointia käyttäen on penkereen kokonaisvarmuuden sortumista vastaan ilman stabilointia oltava vähintään 1,2 laskettaessa maan kestävyuden ominaisarvolla ja ilman liikennekuormaa. Vakavuuden stabiloinnin vaikutus huomioon ottaen tulee täyttää kohdassa 5.1.2 esitetyt vaatimukset. Pohjamaan mahdollinen häiriintyminen pilarien alapään alla tulee ottaa huomioon vakavuutta laskettaessa. Tämä on merkittävää erityisesti silloin, kun maanpinta on kalteva tai stabiloinnin sivulle tulee kaivanto.

Määrämittaiset pilarit mitoitetaan yleensä kimmoisina tai myötäävinä, jos määrämittainen pilarointi rajautuu täysysvään myötäävään pilarointiin.

Määrämittaisen stabiloinnin mitoituslaskelmissa otaksutaan pilarien ja niitä ympäröivän maan toimivan yhtenäisenä vyöhykkeenä. Määrämittaisen stabiloinnin toimiminen vyöhykkeenä on aina arvioitava. Vyöhykkeenä toimimiseen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- riittävä pilaritiheys
- pilarin ja maan muodonmuutosominaisuuksien riittävän hyvä yhteensopivuus
- maan lujuus ja myös häiriintymisominaisuudet silloin, kun rakennetta kuormitetaan pian stabiloinnin jälkeen
- riittävä pilaripituus

Määrämittaisen pilarin minimipituus on 5 metriä. Tästä voidaan poiketa kun määrämittaisia pilareita käytetään siirtymärakenteena tai tieleikkausten pohjan stabilointiin.

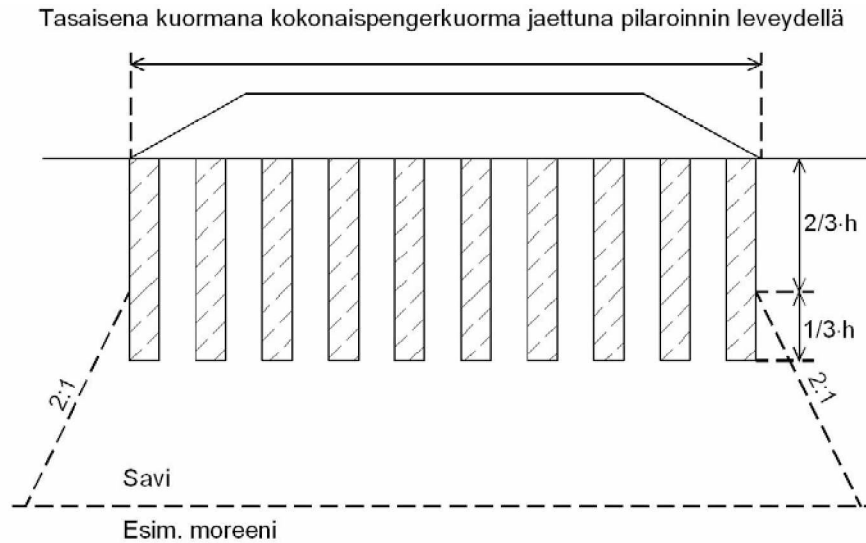
Kun määrämittaista pilarointia käytetään pehmeiköllä siirtymärakenteena (ks. kohta 6.6) ja käytetään lyhenevää pilaripituutta, on tärkeää tarkistaa stabiliateetin riittävyys. Tarvittaessa stabiliateettia voidaan parantaa esimerkiksi pengerkevennyksellä.

### 5.6.3 Painuman laskenta

Määrämittaisen syvästabiloinnin painuman laskennassa on otettava huomioon sekä stabiloitujen maakerrosten että sen alla olevien stabiloimattomien kerrosten painuma.

Stabiloitujen maakerrosten painuma lasketaan luvun 5 mukaan.

Määrämittaisten pilarien alapuolisen maan konsolidaatiopainuma lasketaan normaaliin tapaan esimerkiksi tangenttimoduulimenetelmällä. Jännitysten oletetaan jakautuvan määrämittaisen pilaroinnin alapuolella olevassa maakerroksessa kuvan 11 mukaisesti. Tätä olettamusta noudatetaan, kun pilarointileveys ylittää pilaripituuden. Kun pilarointi on kapea pilaripituuteen verrattuna, jännitysten jakautuminen voidaan tarkastella ottaen tarkemmin huomioon kuormitusten jakautuminen stabiloidun alueen rajapintojen välityksellä pohjamaahan.



Huom! Jos täyttö on huomattavasti laajempi kuin pilarointi, ei kuormituksen voida olettaa pienenevän syvyyden kasvaessa.

Kuva 11. Jännitysten jakautuminen määrämittaisen pilaroinnin alapuolella.

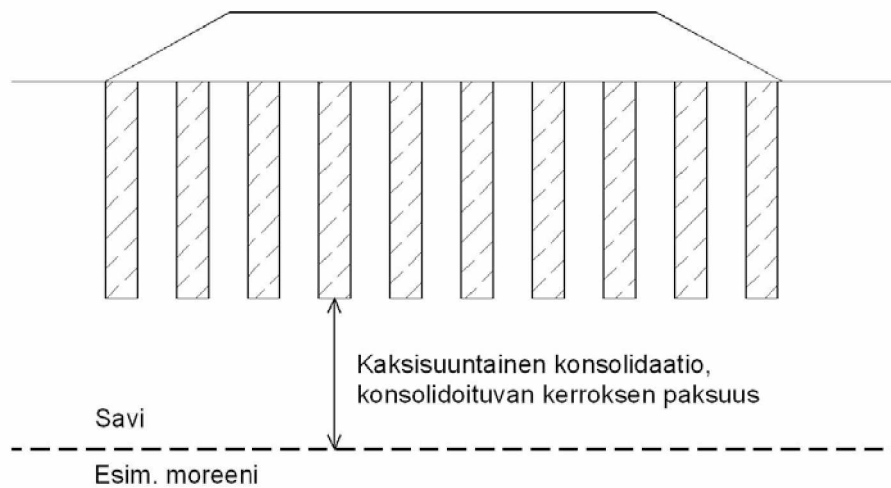
Koska lisäkuormitukset syvemmissä maakerroksissa ovat usein pieniä esikonsolidatiojännityksen määritystarkkuuteen verrattuina, painumalaskelmia täydennetään herkkyytarkasteluilla, joissa otetaan huomioon sekä jännitysjakumaan että esikonsolidatiojännitykseen liittyvät epätarkkuudet.

#### 5.6.4 Painuma-aika ja painumanopeuden laskenta

Stabiloitu maakerros painuu yleensä lyhyessä ajassa eikä painuma ole suuri. Pilarien alapuolisen maakerroksen painuma on suurempi ja nopeudeltaan usein vaikeasti hallittava. Rakentamisen jälkeistä painumaa on usein edullista pienentää esikuormitusta käyttäen.

Määrämittaisten pilarien alapuolisen saven oletetaan konsolidoituvan kaksisuuntaisesti kuvan 12 mukaisesti ainakin silloin, kun sideaineesta vähintään 50 % on kalkkia.





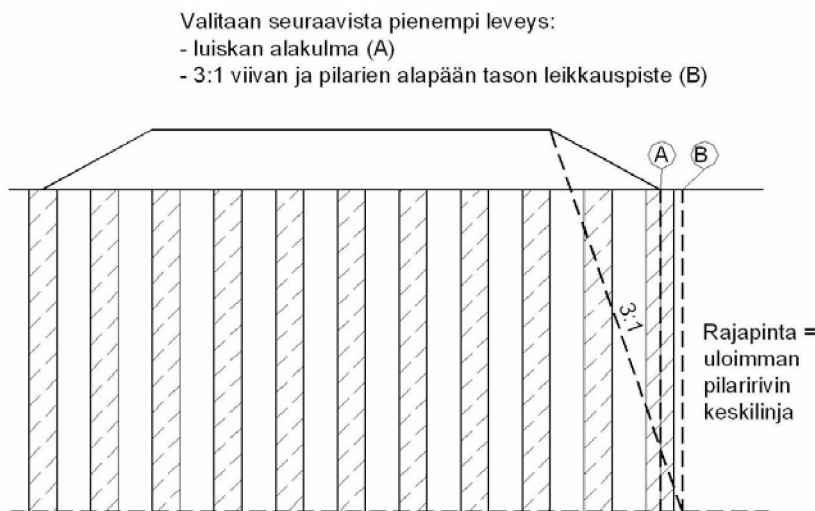
Kuva 12. Määrämittaisen pilaroinnin painumanopeuslaskennan periaate.

Savikerrosten alaosat ovat usein epähomogeenisia, kerroksellisia ja kerrallisia ja ödometrinäytteiden edustavuus painumanopeuden määrittämisessä on tavallista huonompi. Painumanopeuslaskelmissa on aina tarkasteltava sekä minimi- että maksimiarvot. Varsin suuretkaan epävarmuudet painumanopeudessa eivät aina ratkaisevasti vaikuta mitoituspainumaan (painuma mitoitusajana, esimerkiksi 20 vuoden painuma vähennettynä rakennusaikaisella painumalla), sillä  $c_v$ -kertoimen muuttuessa em. painumien erotuksen muutos voi joskus olla pieni.

## 6 Stabiloidun rakenteen suunnittelunäkökohtia

### 6.1 Stabiloinnin leveyden määrittäminen

Kun stabilointileveyttä määritetään pitäen tavoitteena penkereen tasaista painumaa koko leveydellään, voidaan yleensä noudattaa kuvan 13 mukaista ohjetta, jos stabiliteetti ei vaadi suurempaa leveyttä.



Kuva 13. *Pilaroinnin leveys, kun stabiliteetti ei vaadi suurempaa leveyttä. Jos käytetään muuta kuin yksinkertaista neliöverkkoa, uloimman pilaririvin reunalinja tulkitaan keskiarvona eikä uloimman (harvan) rivin mukaisena.*

### 6.2 Työalusta

Suunnitelmassa on määrättävä pilaroinnin työalustan tarve. Yleissuosituksena on määrätä hiekasta (tai murskeesta) tehtävä työalusta pakolliseksi, sillä se edesauttaa pilareiden muodostumista yläpäästään ehjiksi ja edistää tiivistämisvaikutuksen vuoksi pilarien lujittumista. Työalustan merkitystä vähentää pilaroinnin jälkeinen tasotuskaivu, jossa pilarien mahdolliset huonosti onnistuneet yläpää leikkautuvat pois, tai sellaisen pilarointikoneen käyttö, jossa syöttöpainetta voidaan pienentää pilarointikoneen terän lähestyessä maanpintaa.

### 6.3 Pilarien kaltevuus

Pilarit suunnitellaan yleensä pystysuoriksi. Esimerkiksi kun pilarien leikkauslujuus on suurehko (yli 120 kPa) ja pengeri korkeahko, voi joskus olla tarpeen harkita pilarien vähäistä kallistusta penkereen reuna-alueilla luiskassa, jossa pengerkuorman resultantti on vino. Tällöin pilarien kaltevuus harkitaan jokaisessa tapauksessa erikseen.

rakenteen toiminnan kannalta edullisimmaksi ottaen huomioon myös tien mahdollinen myöhempi leventäminen.

Vinoista pilareista voi joskus olla hyötyä, kun tilanahtaus on ongelmana. Ratkaisut ovat tapauskohtaisia.

## 6.4 Lujitteiden käyttö

Lujitteilla voidaan syvästabiloinnin yhteydessä:

- tehostaa kuormien siirtymistä pilareille tavallista suuremmillakin pilariväleillä.
- parantaa penkereen reunaosan stabiliteettia ”ankkuroimalla” penkereen reuna pilaroinnin päälle.
- vähentää kaltevien pilarien tarvetta, vrt. kohta 6.3.

Lujite keskittää kuormia pilareille. Tämän takia on lujitteella varustetuissa pilaroineissa tehtävä pilarien puristusmurtotarkastelu välittömästi kuivakuoren alapinnassa.

Lujitteen valinnassa tulee ottaa huomioon ominaisuuksien säilyvyys emäksisissä olosuhteissa.

## 6.5 Esikuormituksen käyttö

Kuten kimmoisten pilarien osalta on esitetty kohdassa 4.4 ja myötäävien pilareiden osalta liitteessä 1, syvästabilointia kuormitetaan aina rakentamisaikana lopulliseen korkeuteen rakennetulla penkereellä ennen tien päällystämistä. Perusteellisempi esikuormitus (joko normaalipenkereellä kuormittamisajan pidentäminen taikka pienehkö ylipenkereen käyttö) voidaan liittää muun muassa:

- myötäävään pilarointiin, jotta saadaan varmistetuksi painumien tapahtuminen rakentamisaikana
- määrämittaiseen pilarointiin, jotta saadaan merkittävämpi osuus painumista tapahtumaan rakentamisaikana
- muuhunkin pilarointiin, kun halutaan erityisesti varmistua sen toiminnasta.

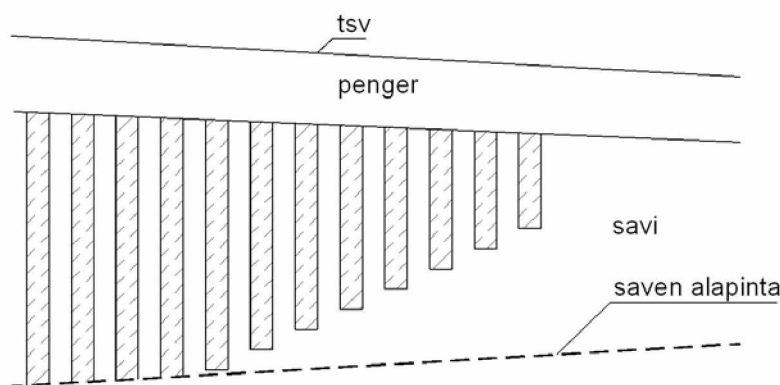
*Normaalimitoituksella syvästabiloinnille perustettu penger kestää 0,5 m yliperkeren, koska mitoituksessa on otettu huomioon kyseisen suuruisen liikennekuorma.*

## 6.6 Siirtymärakenteet syvästabiloinnin yhteydessä

Siirtymärakenteiden suunnittelussa pidetään lähtökohtana, että syvästabilointi on käyttötilassa täysin painumaton rakenne ja siihen rajautuvan penkereen pienikin käytönaikainen painuma aiheuttaa terävän epätasaisuuden.

Syvästabiloinnin yhteydessä käytettäviä siirtymärakenneteroituksia on esitetty julkaisussa Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä TIEL 3200248. Seuraavassa on esitetty täsmennyksiä ko. julkaisun tekstiin.

Kun syvästabilointi rajautuu painuvaan rakenteeseen, esimerkiksi maanvaraiseen penkereeseen, pilarikentän reunimmaisista pilarit suunnitellaan määrämittäisiksi ja jonkin verran painuviksi kuvassa 14 esitetyn periaatteen mukaisesti.



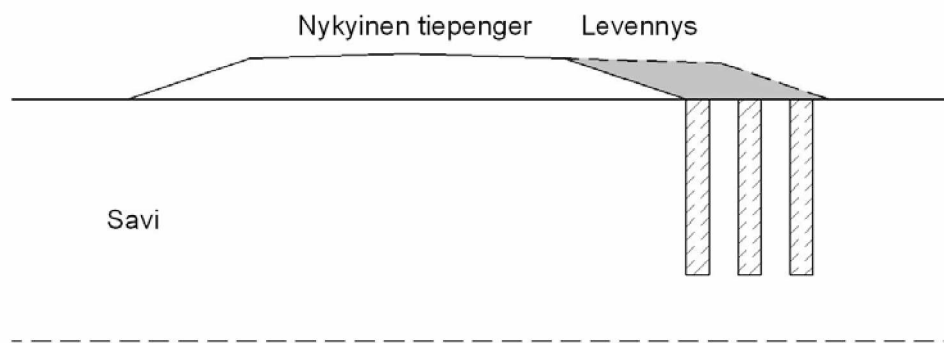
Kuva 14. Syvästabiloinnin rajautuminen maanvaraiseen penkereeseen tien pituussuunnassa. Siirtymäratkaisun periaate.

Kun syvästabilointi rajautuu pengerkevennykseen, ainakin kahden reunimmaisen pilaririvin tekeminen edellä kuvatulla tavalla on suositeltavaa. Jos reunimmaisista pilarit tehdään täyspitkinä, pengerkevennys on mitoitettava siten, että penger stabiloidun ja stabiloimattoman penkereenosan rajakohdalla on painumaton.

Pengerpaalutukseen rajautuva pilarointi ulotetaan painumattomiin maakerroksiin. Pilarointi mitoitetaan kimmoisena vähintään paalutusta lähimpänä olevalta 5 m tai puolen pehmeikkösyvyyden mittaiselta osuudelta. Paalulaatta varustetaan siirtymälaattalla. Siirtymälaatasta aiheutuvaa kuormituksen keskittymistä ei tarvitse ottaa huomioon pilaroinnin mitoituksessa. Paalutusta ja pilarointia ei tarvitse limittää.

## 6.7 Syvästabilointi poikkisuuntaisissa siirtymärakenteissa

Joissain erikoistapauksissa voidaan määrämittaista syvästabilointia käyttää vanhan maanvaraisen tiepenkereen leventämisessä, jos liian painumaton levennys olisi haitallinen poikkisuuntaisten kaltevuusmuutosten takia, ks. kuva 15. Levennyksen painumamitoitus on haasteellista ja parhaassakin tapauksessa epätarkkaa, mutta epätarkkuuksia ja mitoitusriskejä tulee verrata muiden vaihtoehtoisten ratkaisujen vastaaviin riskeihin. Epävarmuutta ratkaisun onnistumiseen aiheuttaa vanhan penkereen painumatilan määrittämisen epätarkkuus sekä vaihtelu tien pituussuunnassa, lievästi määrämittaisen pilaroinnin onnistumisen epätarkkuus sekä painumanopeuskäyttämisen vaihtelu tien poikkisuunnassa.



*Kuva 15. Maanvaraisen tiepenkereen levittäminen lievästi määrämittaista syvästabilointia käyttäen. Nykyisen penkereen sivukaltevuuden suunnan takia liian painumaton levennys olisi hyvin haitallinen. Jos kaltevuus olisi levennyksen puolelle nouseva, tavallisen täyssyvän pilaroinnin mahdollisuus paranisi.*

## 6.8 Ympäristövaikutukset

Syvästabilointityö aiheuttaa savikerrokseen tilapäistä häiriintymistä, joka useimmiten on paikallista ja nopeasti ohimenevää. Häiriintymisen minimointiin ja tarkkailuun on kiinnitettävä huomiota, kun stabilointia tehdään stabiliteetiltaan heikkojen kaivantojen, penkereiden tai luonnontilaisten rinteiden välittömässä läheisyydessä. Häiriintymisen vaikutusta voi vähentää esimerkiksi stabiloinnin tekeminen hiekasta tai sorasta tehdyn työalustan päältä, joka toisaalta vähentää työkoneesta pohjamaalle tulevia paikallisia kuormituksia ja toisaalta tasaisesti kuormittaa ja lujittaa juuri stabiloitua maata. Häiriintymistä voi lisätä tarpeettoman suuren syöttöpaineen ja ilmamäärän käyttö sekä huonosti onnistuva ilman poistuminen maasta pilarikoneen varren suuntaisesti.

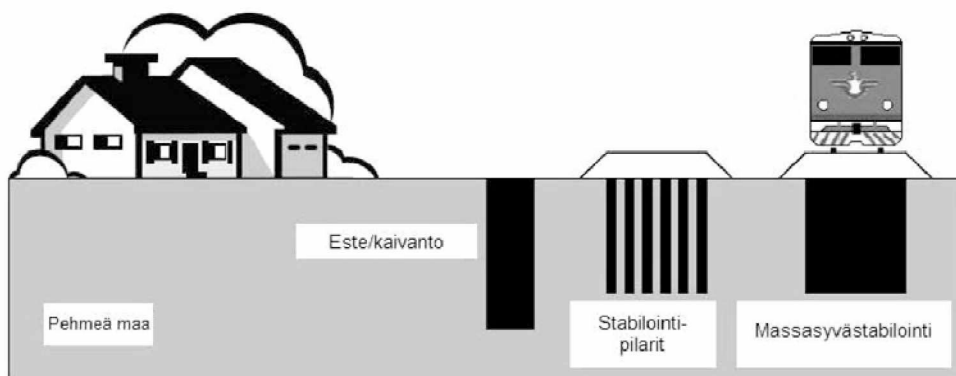
Jos stabiloitavalla alueella esiintyy paineellista pohjavettä, voi joskus olla edullista suunnitella pilarit määrämittäisiksi niin, että ne eivät puhkaise savikerrosta.

Sideaineesta ei saa liueta haitallisia aineita pohjaveteen.

Sideaineen pölyäminen pilarin yläpäästä tehtäessä on usein todettu ongelmaksi. Pölyämistä voidaan vähentää tekemällä pilarointi työalustan päältä, jolloin sideaineen syöttö voidaan haitatta lopettaa jo vähän ennen maanpintaa.

## 6.9 Syvästabilointi värinän leviämisen estämisessä

Syvästabilointia voidaan käyttää liikenne- ja junatärinän ehkäisemiseen. Syvästabilointia voidaan käyttää tien tai junaradan alla maapohjan vahvistamiseen tai eristysseinämänä värinälähteen ja värinästä kärsivien rakennusten välillä (kuva 16). Syvästabiloinnin käyttö maapohjan vahvistamiseen värinälähteen alla pienentää useimmiten värinäherätteen aiheuttaman värinän amplitudia. Lisäksi jäykkä ja tasainen liikenneväylä (rata, tie, katu), vähentää syntyvää värinää. Eristysseinämän toiminta perustuu pääasiassa aaltojen heijastumiseen, vaimentamiseen ja levittämiseen siten, että värähtelyn voimakkuus pienenee seinämän toisella puolella värinälähteestä.



Kuva 16. Syvästabiloinnin käyttö erilaisissa värinäsuojusrakenteissa.

Eristysseinämän vaimennusvaikutus riippuu seinämän dimensioiden suhteesta toisiinsa sekä aallonpituudesta. Seinämän pituuden tulee olla vähintään kolme kertaa eristettävän alueen leveys ja syvyyden tulee olla samaa luokkaa kuin pisin ehkäistävä aallonpituus. Seinämän vaimennusteho pienenee etäisyyden kasvaessa värinälähteestä, esim. junaradasta.

Maassa etenevät värinäaallot voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, runkoaaltoihin ja pinta-aaltoihin. Runkoaalloista tunnetuimpia ovat puristusaallot (P-aallot) sekä leikkausaallot (S-aallot) ja pinta-aalloista Rayleigh-aallot. Suurin osa aaltoenergiasta (45...80 %) leviää Rayleigh-aaltolina.

Pohjasuhteiltaan ongelmallisimpia alueita tärinän kannalta ovat pehmeistä maaleista, kuten siltistä ja savesta sekä turpeesta ja liejuista muodostuneet alueet, joissa tärinän amplitudi on yleensä suurin ja tärinän vaikutusalue ulottuu kauimmaksi. Näillä alueilla ongelmallisin värähtely muodostu heikosti vaimenevista matalista taajuuksista (2...8 Hz). Suomalaisissa stabilointiseinämäkoerakenteissa (mm. Koria) on havaittu saavutettavan hyvä vaimennusteho taajuuksilla 5...10 Hz. Vaimennusteho alle 5 Hz ja yli 13 Hz taajuuksilla vaikuttaisi olevan heikompaa. Joissakin tutkimuksissa on raportoitu radan alle tehtyjen pilareiden voimistavan taajuudella 20...100 Hz, jotka ovat taajuuksia, jotka vaimenevat nopeammin kuin matalammat taajuudet.

Ihmisten kokema tärinä on subjektiivista ja vaihtelee suuresti eri ihmisten kohdalla. Ihmisten kokeman värähtelyn merkittävin taajuusalue on yleensä välillä 1...80 Hz. Yli 10 Hz taajuuksilla useimmat ihmiset kokevat yli 1 mm/s värähtelyt epämiellyttäväksi, kun värähtely on liikenteestä aiheutuva.

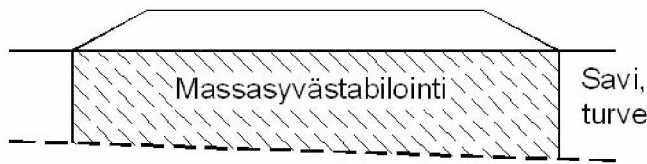
*Tärinän vaimennukseen käytettävän syvästabilointiseinämän suunnitteluun ei ole tällä hetkellä olemassa viimeisteltyjä riittävästi koekäytettyjä ohjeita. Apuna syvästabilointiseinämän suunnittelussa voidaan käyttää joitakin kansainvälisiä tutkimuksia sekä joidenkin ruotsalaisten ja suomalaisten koerakenteiden tuloksia. Kansainvälisiä tutkimuksia ovat mm. Al-Hussainin & Ahmadin [1996] ja Avisilésin & Sánchez-Sesman [1988] tutkimukset katkaisuseinämistä ja paalujen tärinänvaimennustehosta. Ruotsalaisia ja suomalaisia koerakenteita, joissa pilaristabilointia on käytetty tärinän vaimentamiseen ovat mm: Kåhög, Sledskoden, Poppelitie 2004, Koria 2007 ja Raunistola 2009. Poppelitien (Vantaa) kohteessa tutkittiin liikennetärinän vaimenemista, muissa kohteissa on tutkittu ratatärinän vaimenemista. Ruotsissa stabiloinnin käyttöä ratojen tärinähaittojen vähentämisessä on tutkittu laajemmin mm. seuraavissa laajoissa projekteissa FreighVib 1999...2001, PrognosVib 2001...2002 sekä yhteispohjoismainen NordVib 2000...2007. Suomalainen merkittävin projekti, jossa on tutkittu tärinän vaimentamista syvästabiloinnilla, on LITES I, II ja III 2003...2010.*

## 7 Massasyvästabiloinnin suunnittelu

### 7.1 Massasyvästabiloidut rakenteet

Kuvassa 17 on esitetty erilaisia massasyvästabilointirakenteita.

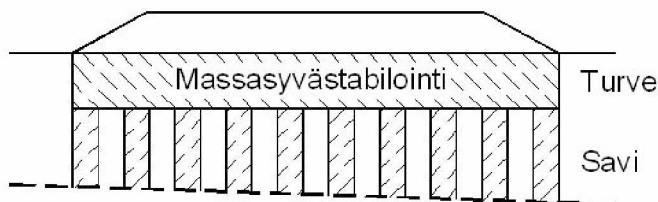
a) Massasyvästabilointi pehmeän kerroksen pohjaan asti



b) Massasyvästabilointi määräsyvyyteen



c) Massasyvästabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä



Kuva 17. Massasyvästabiloituja rakenteita.

Massastabiloinnissa sideaine pyritään sekoittamaan mahdollisimman tasaisesti koko stabiloitavaan massamäärään. Massastabilointi voidaan tehdä suoraan käsiteltävään maaperään (in situ) tai käsiteltävä massa voidaan kaivaa ylös ja stabiloida aumassa, kasassa tai altaassa tai asemasekoittimella. Maaperässä tehtävää massastabilointia kutsutaan massasyvästabiloinniksi erotukseksi kaivetun massan stabiloinnille.

*Massastabilointia voidaan käyttää myös heikkolaatuisten ylijäämämassojen lujittamiseen siten, että massastabiloitu turve, lieju, savi tai siltti voidaan hyödyntää hankkeessa täyttömateriaalina esim. pengertäytöissä, meluvallissa, luiskissa tai maisemointirakenteissa. Tällöin stabiloinnin lujuusvaatimukset ovat yleensä alhaisemmat, koska stabiloinnilla pyritään saamaan pehmeä maamassa lujitetuksi käsiteltävään ja tiivistettävään tilaan. Tämän käyttömuodon merkitys on korostunut viime aikoina ylijäämämassojen läjitysalueista ollessa pulaa.*



Massasyvästabiloinnin maksimisyvyys nykyisillä laitteilla on n. 5 m. Massastabilointiurakoitsijoiden mukaan syvemmällekin (jopa 6...7 m) tehtävä massasyvästabilointi on hyvissä olosuhteissa (esim. ruoppausmassa, pehmeä savi, ...) mahdollista massastabilointilaitteistolla. Vaativissa olosuhteissa jo 5 m syvyisen massasyvästabiloinnin alaosan sideainejakauma saattaa olla hyvin epätasalaatuinen. Massasyvästabiloinnin suunnittelusyvyys on syytä tarkistaa tapauskohtaisesti ja harkiten syvästabilointiurakoitsijoilta kysyen jo suunnitteluvaiheessa, mikäli suunnittelijalla ei ole riittävästi tuoretta kokemusta toteutetusta massasyvästabiloinnista vastaavissa olosuhteissa. Massastabilointilaitteistot luonnollisesti kehittyvät, joten edellä esitetty kuvaa ohjeen kirjoittamisen aikaista tilannetta. Syvemmälle tehtävä massasyvästabilointi on luonnollisesti mahdollista tehdä käyttäen pilaristabilointilaitteistoa ja toisiaan leikkaavia pilareita, jolloin geotekninen mitoitus tapahtuu massastabiloidun maan periaatteilla ja työselitys laaditaan pilaristabilointikohteen periaatteiden mukaisesti.

Massasyvästabiloinnissa sideaineen syöttö ja sekoitustyö tehdään blokeittain. Blokkien koko on riippuvainen mm. stabiloinnissa käytettävän laitteiston ulottuvuudesta, stabiloitavan kerroksen syvyydestä, stabiloitavasta maa-aineksesta. Blokkien koko on normaalisti 4...5 m × 4...5 m. Stabilointityötä tehtäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota sideaineen sekoituksen tasalaatuisuuteen sekä blokkien rajakohtien riittävään limitykseen.

## 7.2 Tutkimukset

Massasyvästabilointia varten tehtävät pohjatutkimukset ovat periaatteessa varsin suuressa määrin samankaltaisia kuin pilaristabilointia varten tehtävät tutkimukset. Tutkimuksilla selvitetään:

- maakerrosrajat
- maakerrosten indeksiominaisuudet, aina vesipitoisuus, hienousluku, humuspitoisuus (massastabilointimenetelmälle on ominaista, että sitä usein käytetään humuspitoisissa maalajeissa, jolloin humuksen määrä ja sen vaihtelut vaikuttavat huomattavasti stabiloituvuuteen ja sideaineen tarpeeseen) ja harkinnan mukaisessa määrin rakeisuus sekä tarvittaessa pH, SO<sub>4</sub> tai Cl
- maakerrosten lujuusominaisuudet, yleensä siipikairauksin
- maakerrosten painumaominaisuudet, yleensä ödometrikokein

Maakerrosten stabiloituvuus selvitetään:

- stabiloituvuuskokein laboratoriossa
- koestabiloinnilla maastossa
- saman geologisen muodostuman aikaisempien stabilointikokemusten perusteella

Massasyvästabiloinnissa usein stabiloidaan erityyppisiä päällekkäisiä maakerroksia keskenään. Esimerkiksi savikerroksen päällä oleva turve sekoitetaan alapuolisen savi-, siltti- tai hiekkakerroksen tai kerroksen yläosan kanssa taikka yläpuolisen hiekkakerroksen kanssa, jolloin turpeen sekaan saadaan mineraalista maa-ainesta parantamaan turpeen stabiloitavuutta. Näin ollen massasyvästabilointia varten tehtävissä stabiloitavuuskokeissa on usein mielekästä sekoittaa päällekkäisiä maakerroksia stabiloitavuuskokeiden runkoaineeksi. Turpeen tai liejun stabiloituvuutta on myös mah-

dollista tehostaa sekoittamalla stabiloitavan kerroksen pinnalle levitetty hiekka tai kivituhka stabiloitavaan maakerrokseen.

Massasyvästabiloinnin leikkauslujuustavoite vaihtelee yleensä välillä 30...70 kPa, ollen harvemmin yli 100 kPa.

Massasyvästabiloidulle massalle on tyypillistä epähomogeenisuus, joten tutkittaessa stabiloitavuutta koestabiloinnilla kairauksia on tehtävä riittävästi myös stabilointiblokkien limitysalueilta. Koestabiloinnilla tavoiteleikkauslujuutta ja sideainemääriä määritettäessä tulisi tehdä noin 8-10 kpl edustavia kairauksia sideaineyhdistelmää (laatu + määrä) kohden.

## 7.3 Massasyvästabiloinnin vakavuustarkastelut

Massasyvästabiloidun rakenteen stabiliteetti voidaan määrittää käyttäen ympyräliukupintoja. Mikäli massastabiloidun kerroksen alle jää heikko ja/tai vino stabilointikerros, suositellaan stabiliteettilaskenta tehtäväksi käyttäen myös yhdistelmäliukupintoja. Massasyvästabiloinnin alapinnan ollessa kitkamaakerroksessa on esimerkiksi kaltevan maanpinnan tai sivukuormitetun rakenteen yhteydessä laskelmia varten arvioitava massasyvästabiloinnin ja kitkamaakerroksen kontaktin laatu eli onko mahdollista, että rajapintaan jää heikkousvyöhyke vai saadaanko massasyvästabilointi hyvin ulotetuksi kitkamaakerroksen pintaan.

Massastabiloidun rakenteen vakavuustarkastelussa voidaan huomioida myös passiivipuolella sijaitseva massastabilointi, kuten tehdään pilaristabiloitujen seinämä-rakenteiden mitoituksessa.

Vakavuustarkastelussa käytetään massasyvästabiloinnin leikkauslujuutena valittua mitoituslujuutta redusoimattomana. Massasyvästabiloinnissa käytettävä sideainemäärä valitaan varovaisesti siten, että mitoituslujuus varmasti saavutetaan. Stabiloimattoman pohjamaan lujuus redusoidaan kuten pilaristabiloinnin yhteydessä.

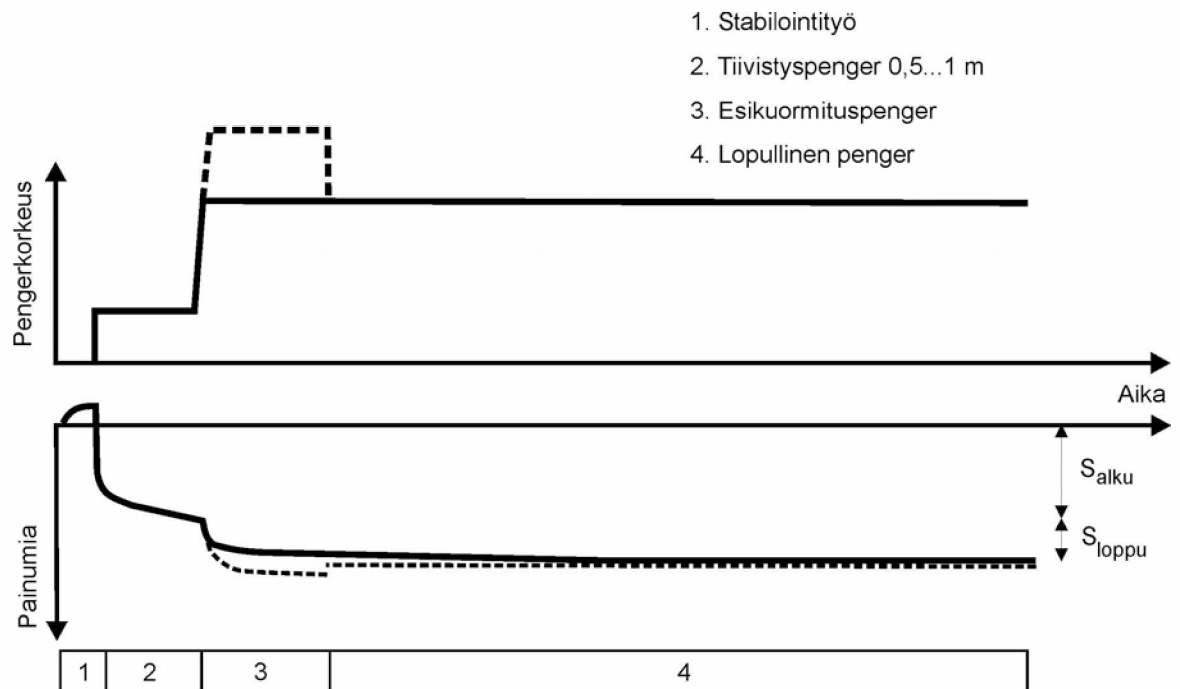
Massastabiloinnin laajuus penkereen sivusuunnassa määritetään kokonaisstabiliteetin perusteella tai soveltaen pilaristabiloinnin yhteydessä esitettyä 3:1-periaatetta.

Kapeaa massastabilointikohdetta stabiloitaessa (kun kone joutuu etenemään juuri tehdyn stabiloinnin päällä, esim. pitkä ja kapea tie suoalueen poikki) saattaa työnäikainen vakavuus olla liian alhainen. Tämän stabiliteetin varmistamiseksi on mahdollista asentaa suodatinkantaan sijaan geovahviste tiivistyspenkereen alle. Tämä vahviste voidaan tarvittaessa huomioida myös lopullisen rakenteen vakavuustarkastelussa.

## 7.4 Massasyvästabiloinnin painumatarkastelut

Massasyvästabiloidun kerroksen painuma tapahtuu seuraavasti (vrt. kuva 18):

- Stabilointityötä tehtäessä massasyvästabiloitu kerros usein löytyy ja sen pinta kohoaa stabiloitavan kerrokseen syötetyn paineilman ja sekoittamisen aiheuttamassa maa-aineksen "kuohkeutumista".
- Massasyvästabiloidun maa-aineksen alkutiivistys tehdään esitiivistyspenkereellä kuormittaen. Esitiivistyspenkereen paksuus on yleensä 0,5...1 m. Joissakin tapauksissa esitiivistys voidaan tehdä tela-alustaisella kaivinkoneella yliajaen. Esitiivistyspenger annetaan vaikuttaa massasyvästabiloinnin lujittumisajan. Massasyvästabiloidun rakenteen suurin painuma tapahtuu usein esitiivistyspenkereen kuormittamana.
- Massasyvästabiloinnin lujituttua riittävästi, rakennetaan varsinainen penger tiivistyspenkereen päälle (tai tarvittaessa tiivistyspenkereen materiaalin korvaten).
- Mikäli on tarpeen minimoida käytön aikaiset painumat, esikuormitetaan massasyvästabiloitu kerros ylipenkereellä. Mikäli massasyvä-stabiloidun kerroksen alle jää painuvia stabiloimattomia kerroksia, joiden painumaa ei saada poistetuksi esikuormittamalla, jatkuu käytön aikainen painuma pidempään ja painuma on suurempi.



Kuva 18. Massasyvästabiloinnin painuman vaiheet esikuormitettuna ja ilman.

Massasyvästabiloinnin, joka on tehty koko painuvan kerroksen osuudelle, kokonaispainuma voidaan arvioida vastaavalla tavalla kuin pilaristabiloinnin painuma (kaava 14).

$$s_{\text{total}} = \frac{q}{E_{50}} \cdot \Delta h \quad (14)$$

$s_{\text{total}}$  = kokonaispainuma

$q$  = pysyvä kuorma

$E_{50}$  = moduuli

$\Delta h$  = massastabiloinnin paksuus

Massasyvästabiloidun kerroksen painuma on kuitenkin syytä laskea vähintään kahdessa vaiheessa (kaava 15):

- tiivistyspenkereen aiheuttama painuma
- lopullisen penkereen aiheuttama painuma

$$s_{\text{total}} = s_{\text{initial}} + s_{\text{final}} \quad (15)$$

Tiivistyspenkereen aiheuttaman painuman suuruudella arvioidaan tarvittavan pengermateriaalin määrää. Lisäksi esitiivistysvaiheen painuman suuruutta tarvitaan lopullisen rakenteen painuman suuruutta arvioitaessa – lopullisen penkereen ja massasyvästabiloidun kerroksen paksuus lopullisessa painumalaskennassa määritetään esitiivistymisvaiheen painumien perusteella. Esitiivistymisajan/lujittumisajan moduulin suuruus on riippuvainen mm. stabiloitavan massan laadusta. Pehmeällä turpeella moduuli on pienempi ja jäykällä savella suurempi.

Tiivistyspenkereen aiheuttama painuma arvioidaan kaavalla 16.

$$s_{\text{initial}} = \frac{q_{\text{tiivistyspenger}}}{E_{\text{initial}}} \cdot \Delta h \quad (16)$$

$E_{\text{initial}}$  = esitiivistymis- /lujittumisajan moduuli (usein  $\approx 0,1 \dots 0,3$  MPa), joka voidaan tarkemmin määrittää mittaamalla stabiloiutuvuuskokeissa lujittumisajan painuma

Yleensä massastabiloidun kerroksen esitiivistymän voidaan arvioida olevan 15...30 % massastabiloitavan kerroksen alkuperäisestä paksuudesta.

Lopullisen penkereen painuma arvioidaan kaavalla 17.

$$s_{\text{final}} = \frac{q_{\text{total}}}{E_{\text{final}} \cdot (\Delta h - s_{\text{initial}})} \quad (17)$$

$s_{\text{final}}$  = lopullisen penkereen aiheuttama painuma

$q_{\text{total}}$  = lopullinen pengerkuorma, jossa huomioidaan esikuormitusajan painuma

$E_{\text{final}}$  = lujittuneen massasyvästabiloidun maan moduuli (usein  $\approx 350 \dots 450 \times \tau$ )

Mikäli käytetään esimuormituspengertä, suositellaan ko. penkereen aiheuttama painuma ja sen jälkeen tapahtuva painuma arvioitaviksi erikseen.

Tässä esitetyt massastabiloidun kerroksen moduulit ovat tarkkuudeltaan suuntaa-antavia, ja mitoituksessa käytettävät moduulit on arvioitava tapauskohtaisesta laboratoriokoetulosten perusteella tai kokemuseräisesti. Moduuleihin vaikuttavat mm. maa-aineksen laatu, sideainemäärä, sideaineen tyyppi ja lujittumisaika tiivistyspenkereen alla.

Massasyvästabiloitu kerros on yleensä matala verrattuna kuormittavan penkereen leveyteen ja lisäksi massasyvästabiloitu kerros on yleensä huomattavasti viereisiä stabiloimattomia maakerroksia jäykempi, joten pengerkuoman voidaan olettaa kohdistuvan kokonaisuudessaan massastabiloituun kerrokseen ilman kuorman jakautumista massasyvästabiloinnin vierelle.

Mikäli massasyvästabiloinnin alle jää painuvia maakerroksia tai alapuolelle tehdään pilaristabilointi, on painumatarkastelu tehtävä ko. seikat huomioiden.

Massasyvästabiloidun kohteen rakentamisaikataulu on aina suunniteltava tapauskohtaisesti, mutta suuntaa antavana aikatauluna päällystetyn rakenteen rakentamisaikataulun arvioinnissa voidaan käyttää:

- 0,5...3 kk - tiivistyspenger
- 1...3 kk lopullinen tiepenger (vaiheittain korottaen)
- 1...6 kk yli-/esikuormituspenger (stabiliteetti yms. huomioiden)
- 2...6 kk kantava kerros
- 3...9 kk päällyste

Rakentamisen aikaisen aikataulun tarkistamiseen ja seurantamittaushavaintojen keräyttämiseksi suositellaan tehtäväksi painumamittauksia massasyvästabiloiduissa kohteissa. Seurantamittaukset voidaan tehdä esim. painumalevyillä tai -letkuilla.

## 8 Syvästabilointisuunnitelman sisältö ja laadunvalvonta

### 8.1 Piirustukset

Syvästabilointisuunnitelman tärkein piirustus on kartta. Kartan mittakaavana käytetään 1:200 ainakin, kun pilarikenttien muoto on vaihteleva, pilarikenttä rajautuu epä-säännöllisen muotoiseen paalukenttään tai pilarikentän alueella on pienipiirteisesti vaihtelevia muita pohjanvahvistuksia. Yksinkertaisissa tapauksissa voidaan käyttää mittakaavaa 1:500.

Pilarikartalla esitetään:

- pilarikenttien rajat ja pilaritiheydet
- pilarikenttien nurkkapisteiden koordinaatit
- monissa tapauksissa yksittäiset pilarit
- tarvittaessa esimerkiksi pohjatutkimuspisteet
- pilarien pituus tai tavoitetaso kentänosittain: syvyyskäyrät tai maakerrosraja/määrätaso
- pilarikentän rajautuminen muihin pohjanvahvistuksiin tai pohjarakenteisiin
- pilarien halkaisija, tavoitelujuus, sideaineen laatu ja määrä kentänosittain

Kartan lisäksi pilarointi esitetään pohjanvahvistussuunnitelman pituusleikkauksissa (mittakaava yleensä 1:200/1:200) ja paalukohtaisissa poikkileikkauksissa (mittakaava yleensä 1:200). Leikkauspiirustuksissa esitetään yksityiskohtaisesti pohjatutkimukset ja pilarien tavoitetaso sekä siirtymärakenteet.

### 8.2 Laatuvaatimukset ja työselitykset

Syvästabiloinnin työkohtaisissa laatuvaatimuksissa ja työselityksissä on esitettävä seuraavat asiat sikäli kuin ne eivät riittävästi käy ilmi yleisistä laatuvaatimuksista ja työselityksistä:

- pilarikenttien ja pilarien sijaintitoleranssit
- pilarien kaltevuustoleranssit
- sideaineen laatuvaatimukset
- sideaineen määrä ja sen sallitut poikkeamat
- pilaroinnin sekoitustyövaatimukset (terätasomäärä, sallittu nousunopeus)
- tarvittaessa muita työohjeita: syöttöpaineen maksimiarvo, varoitus tarpeettoman suuren ilmamäärän käytöstä jne.
- miten em. työohjeiden noudattaminen on osoitettava
- pilarien lujuusvaatimus ja sallitut poikkeamat, tarvittaessa syvyystasoin eriteltyinä
- ennakkosuunnitelma, miten pilarien lujuusvaatimusten täyttymistä seurataan
- alustavat laadunvalvontatutkimusten tulkintaohjeet, esimerkiksi  $N_c$ -kerroin
- ohjeet, missä vaiheessa pilareita saadaan kuormittaa
- tarvittaessa ohjeet pilarien välisen saven lujuudenpalautumisen tarkkailusta.

## 8.3 Syvästabiloinnin laadunvalvonnan sisältö

Syvästabilointi on prosessi, jolle suunnitelma-asiakirjoissa annetaan ohjeita sekä asetetaan tavoitteita ja vaatimuksia. Ohjeet, tavoitteet ja vaatimukset koskevat käytettävää sideainetta, stabilointityötä ja lopullista rakennetta. Stabilointityötä koskevien tavoitteiden ja vaatimusten toteutumisen osoittaa urakoitsija dokumentoimalla tehdyn stabilointityön. Toteutuneesta rakenteesta tutkitaan sen yksittäisten osien (pilarien tai massastabilointiblokkien) ominaisuuksia ja verrataan niitä asetettuihin tavoitteisiin ja vaatimuksiin yksittäisinä havaintoina ja toisaalta koko rakenteen kannalta. Lopulliseen rakenteeseen kohdistuvista laadunvalvontatoimenpiteistä vastaavat riippumaton laadunvalvoja ja paikallisvalvoja.

Stabilointityön dokumentointi ja toteutuneesta rakenteesta tehtävien laadunvalvontatoimenpiteiden laajuus on esitetty suunnitelma-asiakirjoissa. Liitteen 4 taulukoissa on esitetty stabilointityön laadunvalvontatoimenpiteitä, joiden avulla voidaan arvioida stabilointityön onnistuminen.

## 8.4 Toteutuneen syvästabiloinnin tutkimusmenetelmät

Laadunvalvontakairauksina ovat yleisimmin käytössä pilari- ja pilarisiipikairaus. Mikäli pilari- tai massastabilointi on niin lujaa, ettei pilarikaira tunkeudu siihen (rajana yleensä pilarin leikkauslujuus 200–250 kPa eli aletaan olla tämän ohjeen soveltamisalueen ulkopuolella), käytetään yleensä puristinheijarikairautta. Lujissa ja pitkissä pilareissa suositellaan käytettäväksi esiporausta ennen laadunvalvontakairauksen suoritusta. Kairaukset suoritetaan esiinkaivetun pilaroinnin päistä tai massastabiloinnin pinnalta. Mahdollisen suodatin-/lujitekankaan takertuminen kairaamiseen on estettävä esim. tekemällä laadunvalvontakairaus kankaaseen viilletyn reiän läpi.

Sekä pilari- että puristinheijarikairauksella mitataan pilarin saavuttamaa leikkauslujuutta välillisesti. Pilarisiipikairautta käytetään pilari- ja puristinheijarikairauksen kalibroinnissa kantavuuskertoimen arviointiin. Pilarikairauksella tutkittavan stabiloinnin leikkauslujuus on yleensä enintään 300 kPa, mutta tarkkuus heikkenee vaippakittikan vaikutuksesta jo 150–200 kPa jälkeen.

Puristinheijarikairauksella (kärjen pinta-ala  $A = 16 \text{ cm}^2$ ) voidaan korvata tai täydentää pilarikairauksia, jos pilareiden leikkauslujuus on yli 100 kPa. Tulosten tulkinnassa on kuitenkin otettava huomioon pilarikairan kärkeä pienempi muodoltaan kartiomainen kärki.

Heijarikairausvastus tulkitaan pilarinleikkauslujuudeksi tämän ohjeen soveltamisalueella yleensä olettaen kairausvastuksen 10 lyöntiä/0,2 m vastaavan kärkivastuksen  $q_c$  arvoa 1 MPa. Kun tulosten tulkinnassa yleensä käytetään kantavuuskertoimen  $N_c$  arvona 10, vastaa 10 lyöntiä/0,2 m heijarikairausvastus pilarin leikkauslujuutta 100 kPa ja 20 lyöntiä/0,2 m pilarin leikkauslujuutta 200 kPa.

CPTU-kairausta ( $A = 10 \text{ cm}^2$ ) suositellaan käytettävän ainoastaan kohtuullisen alhaisen lujuuden omaavien pilareiden ja massastabiloinnin tutkimuksissa. CPTU-kairan kärjen poikkipinta-ala verrattuna koestettavan pilarin poikkipinta-alaan on niin pieni, että koestuksen yleistäminen koskemaan koko pilarin poikkipinta-alan lujuusominaisuuksia on kyseenalaista (Larsson, 2005). CPTU-kairan kärjen pinta-ala on pieni, joten yhden kairauksen edustavuus saattaa olla vähäinen. Näin ollen CPTU-kairauksia suositellaan tehtäväksi vähintään enemmän kuin esim. pilarikairauksia eikä sillä suositella täysin korvattavaksi pilarikairauksia. Varsinkin, jos pilarin halkaisija on suuri, voidaan tehdä vertailevia CPTU-kairauksia muualtakin kuin pilarin keskeltä. Etuna CPTU-kairauksessa on vaippavastuksen eliminoituminen mitattaessa kärkivastusta suoraan kärjestä eikä tangon yläpäästä kuten pilarikairassa. Pilarikairaustulosten tulokinnassa ei toistaiseksi ole vakiintunutta käytäntöä mahdollisen vaippavastuksen huomioimisesta.

Jos stabiloinnin leikkauslujuutta mitataan välillisillä menetelmillä (esim. pilarikairauksella), tulisi InfraRYL:in mukaan suunnitelma-asiakirjoissa esittää vaadittu vähimmäisarvo suunniteltua leikkauslujuutta vastaavana kairausvastuksena.

Näytteenoton huonona puolena pilarien tutkimisessa on, että ehjän näytteen ottaminen onnistuu varsin vaihtelevasti eri pilarin toteutuneesta lujuudesta riippuen (ts. näytteen ottaminen saattaa epäonnistua vaikkapa pilarin erityisen hyvän lujuuden takia).

Mikäli stabiloinnista otetaan jatkuva näyte niin lujuuden (erityisesti lujuusvaihtelu) arvioinnissa voidaan käyttää tehokkaasti penetrometrimittauksia. Lisäksi, jatkuvat näytteet kannattaa aina valokuvata ja tehdä silmämääräinen arviointi tasalaatuisuudesta/vaihtelusta yms. Näytteiden puristuskoe on suositeltavaa tehdä 3-aksiaalikokeena. Mikäli näyte on vähänkin häiriintynyt tai murtunut näytettä otettaessa, saadaan 1-aksiaalisella puristuskokeella liian alhainen lujuus.

## 8.5 Valvontakairausten edustavuus

Kairausten edustavuus arvioidaan pääasiassa kairausmäärän ja kairauspisteiden sijainnin sekä kairausten onnistumisen perusteella. Laadunvalvontakairausten määrä esitetään usein osuutena koko stabilointityöstä. Lisäksi kairausten tulee olla kattavasti koko rakennuskohteen alalta. Leikkauslujuuden määrittämiseksi pilareista on suositeltavaa tutkia vähintään 1 %, ellei suunnitelma-asiakirjoissa toisin mainita. Suurissa kohteissa voidaan käyttää pienempää määrää kuin 1 %. Samoin voidaan koestusmäärää pienentää työn aikana, jos tulokset ovat erityisen hyviä. Tilastollisen luotettavuuden saavuttamiseksi suositeltava vähimmäiskoestusmäärä on vähintään 5 pilaria käytettyä pilarityyppiä tai rakennetta ja aluetta kohden. Massastabiloinnilla suositeltava kairausten minimimäärä yhtä massastabiloinnin sideaine + stabiloitava materiaali -yhdistelmää ja aluetta kohden on 8...10 kairausta.

Koestettavia pilareita valittaessa ja tuloksia käsiteltäessä tulee jo suunnitteluvaiheessa huomioida kohteeseen mahdollisesti eri rakennetyypeiksi suunniteltu pilarointi. Tulokset tulee käsitellä rakennetyyppikohtaisesti edustavasti sekä alueen geologiset vaihtelut huomioiden. Mikäli esim. saven ominaisuudet muuttuvat stabilointi-



alueella, ei yhdistetä eri savialueiden pilareita keskenään samoihin keskiarvodigrammeihin, vaikka pilarihalkaisija ja sideaine olisivatkin samat.

Yksittäisten kairaustulosten tilastollisen riippumattomuuden varmistamiseksi tulisi yksittäisten kairausten olla vähintään 2,5...3 metrin etäisyydellä toisistaan (Larsson & Nilsson, 2009, esitetty suositus vähintään 4 m). Käytännössä pilareiden yläpäiden tai massastabilointipinnan esiinkaivu esikuormituspenkereen alta voi olla työlästä, jolloin samasta kuopasta tehdään useampia kairauksia. Samasta kuopasta ei kuitenkaan saisi tehdä enempää kuin 2-3 kairausta ja silloinkaan kairauksia ei saa tehdä vierekkäisistä pilareista. Ensisijaisesti koestukset tulee kuitenkin jakaa tasaisesti koko tutkimusalueelle ja koestukset tulee suorittaa pilaria mahdollisimman hyvin edustavalla kairauslajilla.

Lisäksi laajoissa tai hankalissa kohteissa suositellaan suoritettavaksi referenssikairauksia luonnonmaasta samoilla koestusmenetelmillä kuin stabiloidusta massasta.

## 8.6 Tutkimusraportti

Tutkimusraportissa tulee esittää:

- kairaustulokset tulkittuna
- koestettujen pilarien ikä koestushetkellä
- kairausten perusteella lasketut pilarien leikkauslujuudet
- leikkauslujuuksien keskiarvot ja vaihtelu
- lujuuspoikkeamat suunnittelulujuuteen verrattuna.

Lisäksi esitetään arvio suoritettujen kairausten edustavuudesta kohteessa.

Jos syvästabiloinnin päällä on suodatinkangas ja täyte, niin täyte sekä kangas on kaivettava pois ja pilarikaira asennettava stabiloinnin päälle sekä tarvittaessa putkitettava kairatangot. Yleensä jo n. 0,5 metrin täytekeros on kaivettava pois (riippuu täyteen laadusta).

## Kirjallisuus

Baker, S. Deformation Behavior of Lime/Cement Column Stabilized Clay. Department of Geotechnical Engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg 2000.

Björkman, J., Ryding, J. Kalkcementpelares mekaniska egenskaper. Master Thesis. Royal Institute of Technology, Department of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.

Broms, B. B. Can Lime/Cement Columns be used in Singapore and South-east Asia, 3rd GRC Lecture, 19 November 1999. Nanyang Technological University. NTU-PWD Geotechnical Research Centre. Singapore 1999.

Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Rapport 2:2000. Svenska Geotekniska Föreningen.

Kalkkipilariohje KPO 2000. Ohjelunnon koekäyttöön. Espoon kaupungin tekninen keskus, geotekniikkayksikkö. Espoo 2000.

Kivelö, M. Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns. Doctoral thesis 1023. Royal Institute of Technology. Division of Soil and Rock Mechanics. Stockholm 1998.

Larsson, S. 2005. On the use of CPT for quality assessment of lime-cement columns. DeepMixing '05, Stockholm, Sweden, May 23-25, 2005

Larsson, S. & Nilsson, A, 2009. Horizontal strength variability in lime-cement columns – field study. Deep Mixing 2009 Okinawa Symposium, International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilisation. 19.-21.5.2009, Japan.)

Mäkelä, H. Kehä III – Massastabilointi koerakenteena. Uudenmaan tiepiirin sisäinen julkaisu. Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri. Helsinki 1994.

Nikkinen, J. Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta. Tielaitoksen selvityksiä 15/2000. Tielaitos. Helsinki 2000. TIEL 3200604.

Pohjarakennusohjeet 1988. RIL 121-1988. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.

Tien perustamistavan valinta. Tiehallinto. Helsinki 2003. TIEH 2100019-03.

Porbaha, A. State of the art in deep mixing technology. Part IV: design considerations. Ground Improvement, July 2000.

Syvästabiloinnin kehittäminen. Osaprojekti B: Harvennettu pilarointi lujitteita käyttäen. Koekohteen mittaustulosten raportti vuodelta 2000. Tielaitoksen tutkimuksia 2000. Tielaitos. Helsinki 2000.

Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 1: Toteutetut kohteet. Tielaitoksen selvityksiä 2/1999. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 3200540.

Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 2: Laadunvalvontatutkimukset ja laadunvalvontatutkimusten vaikutus. Tielaitoksen selvityksiä 3/1999. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 3200541.

Teiden pehmeikkötutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 3200520.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 2100002-01.

Tiesuunnitelman pohjatutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1998. TIEL 2180003.

Tekniska Kravdokument Geo (TK Geo). Banverket BVS 1585.001, Vägverket 2009:46. Tukholma 2009.

Tyynelä, P. Määramittaisen syvästabiloinnin mitoitus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Tampere 2000.

Uotinen, V-M. Syvästabiloinnin ennakkokokeet. Sideaineen valinta maalajin ja vesipitoisuuden perusteella. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan erikoistyö Rak-50.150. Teknillinen korkeakoulu. Espoo 1994.

Vepsäläinen, P. Tiepenkereen holvaantuminen, teoreettinen osa. Tielaitoksen selvityksiä 3/1990. Tielaitos. Helsinki 1990.

Viljanen, J. Eurokoodin vaikutus pilaristabiloidun maan varaan perustetun ratapenkereen mitoitukseen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo 2010.

Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi. Tutkimusraportti. Tielaitoksen selvityksiä 81/1993. Tielaitos. Geokeskus. Oulu 1993. TIEL 3200205.

Åhnberg, H. Strength of Stabilised Soil – A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Lund 2006.



## Myötäävän pilaroinnin mitoitus

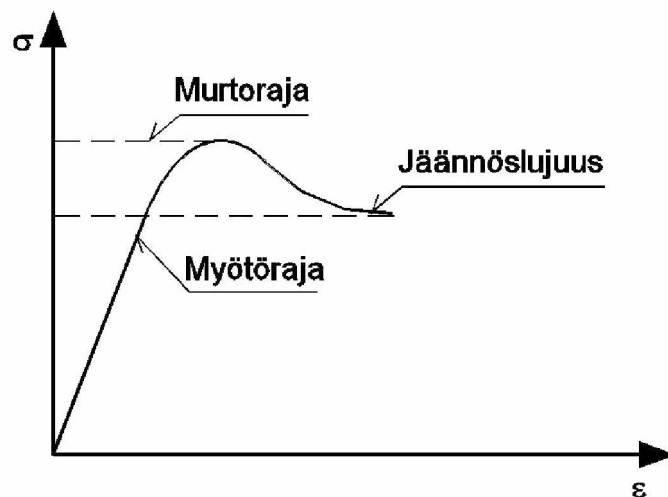
Tämän liitteen sisältö otetaan tarvittaessa käyttöön hankekohtaisella päätöksellä. Samalla voidaan harkita numeroarvojen valintaa.

### Myötäävän pilaroinnin painumamitoitus

Myötäävälle pilarille asetettavat vaatimukset ovat:

- Sideaineena käytetään kalkkia tai kalkkisementtiä, jossa kalkin osuus on vähintään 50 %, tai sideaineella osoitetaan olevan vastaavat ominaisuudet, mitä tulee jäännöslujuuteen ja pilarin vedenjohtavuuteen.
- Pilarin lujuus ei ylitä 10-kertaista pohjamaan lujuutta. Tällöin tarkastellaan pystysuunnassa 2 m matkalla laskettua lujuuden keskiarvoa.
- Penkereen varmuus sortumaa vastaan ilman pilarien vaikutusta on riittävä (lasketaan kuten kimmoisilla pilareilla, ks. kohta 5.1), jotta pilareita ei tarvitse asettaa yhtenäisiksi rakenteiksi.
- Laskettu painuma ei yhdessäkään geoteknisessä kerroksessa (ei tarvitse tarkastella alle 2 m paksuisina kerroksina) ylitä 5 % pilaripituudesta eikä laskettu kokonaispainuma ylitä 250 mm.
- Penkereelle varataan painumanopeuslaskelmien mukainen, vähintään 3-6 kuukauden pituinen, seisona-aika täydessä korkeudessaan ennen tien päällystämistä.

Myötäävän pilaroinnin mitoitus voidaan aloittaa suoraan ottamalla alustavaksi pilari-  
tiheydeksi esimerkiksi vakavuuden perusteella määritetty minimitiheys tai jokin muu  
sopiva arvio.



Kuva L1. Myötäävän pilarin kuormitus-muodonmuutos-käyrä. Myötäävän pilarin mitoitus perustuu siihen, että kuormitus ylittää myötörajan (70 % murtolujuudesta) ja painumat lasketaan olettaen käyrän loppuosa myötörajan jälkeen korvatuksi kuvaan piirretyllä alemmalla katkoviivalla

Myötäävän pilaroinnin painumamitoituksen lähtökohtana on tasaisen painuman periaate kuten kimmoisellakin pilarilla. Myötökuorman oletetaan olevan 70 % murto-kuormasta kuten kimmoisellakin pilarilla (kuva L1). Maalle tuleva kuorma lasketaan myötäävän pilarin tapauksessa kaavalla L1. Pilarikuorma lasketaan kaavalla 10, mutta liikennekuorman vaikutusta ei oteta huomioon.

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} \quad (\text{L1})$$

$q_{\text{maa}}$  on maalle tuleva osa kuormituksesta

$q_0$  kokonaiskuorma (liikennekuorma jätetään tässä pois)

$a$  pilarien suhteellinen pinta-ala

$\sigma_{\text{murto}}$  pilarin puristuslujuus, kaava 11

Yksinkertaisimmassa tapauksessa (homogeeninen, normaalikonsolidoitunut pohjamaa) painuma voidaan laskea aikaisemmin esitetyllä kaavalla 7.

Myötäävän pilaroinnin painumamitoituksen osalta oleellista on laskelmin varmistaa:

- etteivät painumat ole niin suuria, että pilarit eivät säilytä muotoaan (raja-arvo on 5 % pilaripituudesta geotekniset kerrokset erikseen tarkasteltuna, ei kuitenkaan tarvitse jakaa alle 2 m paksuihin kerroksiin) ja ettei laskennallinen kokonaispainuma ylitä 250 mm (tähän lasketaan mukaan painuma sillä syvyydellä, jossa pilarien myötökuorma ylittyy)
- että painumat ehtivät riittävän varmasti tapahtua rakentamisaikana.

*Painuman suuruuden laskentaan liittyy merkittävä epätarkkuus pilarien todellisen myötökäyttäytymisen arvioinnin osalta, joten painumalaskelman menetelmällä ei ole ratkaisevan tärkeää merkitystä. Pilareita ympäröivän maan osalta pitää kuitenkin tutkia, voidaanko käyttää ylikonsolidoituneen alueen parametreja, jolloin painumat jäävät pieniksi. Laskelmien lähtötiedoiksi tarvitaan jo alustavissa tarkasteluissa ödometrikokeita, jotta myötäävän pilaroinnin käyttömahdollisuudet voidaan selvittää.*

Pilarin vedenjohtavuuskerroin oletetaan ruotsalaisissa ohjeissa (TK Geo 2009) saveen vedenläpäisevyyteen verrattuna 1000-kertaiseksi käytettäessä sideaineena kalkkia ja 500-kertaiseksi käytettäessä kalkkisementtiä tai sementtiä. Ruotsissa on havaittu penkereiden painumanopeuksien olleen laskettua suuruusluokkaa. Pilarin suuri vedenjohtavuus luonnontilaiseen saveen verrattuna johtunee pilarin epähomogeenisuuksista varsinkin pilarin keskikohdalla sekä vaipalla, sillä laboratorio-olosuhteissa stabilointi ei yleensä lisää savinäytteen vedenläpäisevyyttä. Pilarin hyvä vedenjohtavuus pätee siis ainakin tähänastisella pilarointitekniikalla. Pilarin tasalaatuisuuden paraneminen voisi muuttaa tilanteen.

Myötäävien pilarien painumanopeustarkastelu aloitetaan laskemalla, mihin syvyyteen asti pilarit kuormittuvat yli myötörajan. Jos ko. syvyys kuivakuoren alarajasta mitattuna on alle 2 m, voidaan painumien olettaa tapahtuvan 3 kuukaudessa ja jos ko. syvyys on 2–3 m, voidaan painumien olettaa tapahtuvan 6 kuukaudessa. Suuremmilla myötäävän kerroksen paksuuksilla suoritetaan seuraavassa esitettävä tarkempi painumanopeuslaskelma käyttäen riittävän varovaista olettamusta pilarin vedenläpäisevyyksikertoimelle.

Pilaristabiloidun pohjamaan konsolidaatioaste voidaan laskea yhtälöllä L2:

$$U = 1 - e^{\frac{-2 \cdot c_h \cdot t}{R^2 \cdot f(n)}} \quad (L2)$$

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \left[ \ln(n) - 0,75 + \frac{1}{n^2} \cdot \left( 1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right] + \left[ \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{k_{maa}}{k_{pil}} \cdot L_D^2 \right]$$

$$n = \frac{R}{r}$$

U on	konsolidaatioaste
c <sub>h</sub>	vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin
t	aika
R	pilarin vaikutussäde (sen ympyrän säde, jonka pinta-ala on yhtä suuri kuin yhdellä pilarilla lujitetun alueen pinta-ala)
r	pilarin säde
k <sub>maa</sub>	maan vedenläpäisevyyskerroin
k <sub>pil</sub>	pilarin vedenläpäisevyyskerroin
L <sub>D</sub>	puolet pilaripituudesta (2-suuntainen konsolidaatio) tai pilaripituus (1-suuntainen konsolidaatio)

Myötäävää pilarointia on ehdottomasti suositeltavaa kuormittaa mahdollisimman pian pilarointityön jälkeen ja niin suurella kuormalla, kuin vakavuus sallii. Varmuuden sortumaa vastaan on myös työn aikana oltava lopputilanteen vaatimusten mukainen.

*Myötäävän pilaroinnin todellinen painuma saattaa usein alittaa lasketun painuman, mihin syynä on lähinnä myötörajolettamuksen yksinkertaistus.*

### Myötäävän pilaroinnin tarkkailu

Myötääväksi mitoitettujen pilarointien painumia on tarkkailtava vähintään suunnittelun painuma-ajan kerran kuukaudessa ja painumatarkistimia asennetaan:

- alle 1000 m<sup>2</sup> stabilointikohteeseen vähintään kaksi kappaletta
- ja lisäksi vähintään yksi painumamittari kutakin alkavaa 2000 m<sup>2</sup> kohden.

*Myötäävän pilaroinnin käyttöedellytyksiä voidaan hankekohtaisesti harkita tiukennettaviksi. Tällöin voidaan esimerkiksi rajoittaa sallittua laskennallista painumaa tai lisätä painumatarkkailua.*

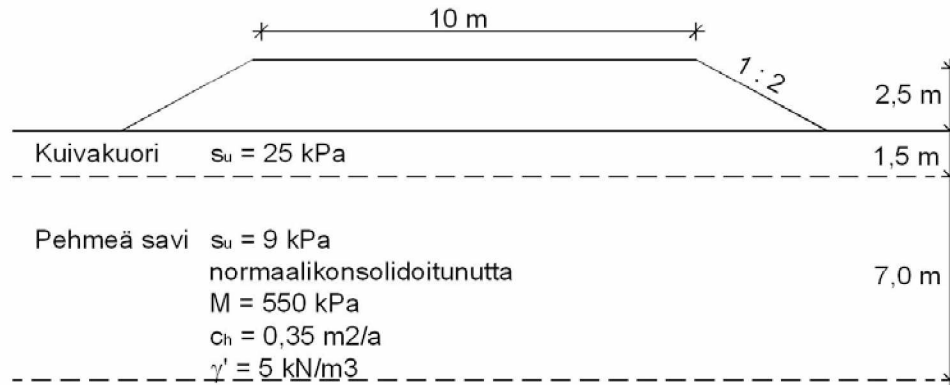
### Muuta myötäävän pilaroinnin suunnittelusta

Myötääväksi mitoitettujen pilarointien suunnittelussa noudatetaan tämän ohjeen tekstiä niiltä osin, kuin teksti ei nimenomaisesti ole suunnattu kimmoisien pilareiden, myötäävien pilareiden tai massasyvästabiloinnin suunnitteluun.





## Esimerkkimitoitus 2,5 m penkereelle



Muut lähtötiedot: vastapenkereille ei tilaa  
sideaine kalkkisementtiä (kalkkia 50 %)  
pilarin vedenjohtavuus/maan vedenjohtavuus 100

Tarkistetaan luonnontilainen vakavuus ilman liikennekuormaa (kohta 4.1). Maan kestävyiden osavarmuusluku 1,21. OK

### 1. Aloitetaan kimmoisan pilaroinnin mitoitus (kohta 5.2):

Lujuuskokeiden perusteella pilarin leikkauslujuudeksi on määritetty 100 kPa. Pilarin halkaisijaksi valitaan 600 mm. Arvioidaan (kursivoitu teksti kohdassa 5.2) k/k-väliksi tällöin 0,90 m. Pilarien suhteellinen pinta-ala  $a$  (kaava 6) on tällöin 0,349.

Arvioidaan kaavalla (5) pilarin muodonmuutosmoduuliksi 17900 kPa

Kaava 4: (pilarien arvioidaan ottavan 90 % kuormasta, kohdan 5.2 kursivoitu teksti)

$$s_{pil} = \frac{\Delta h \cdot q_{pil}}{a \cdot E_{pil}} = \frac{7 \cdot 0,9 \cdot (2,5 \cdot 20)}{0,349 \cdot 17900} = 50,4 \text{ mm}$$

Kaava 7: (maan ottaessa vastaavasti 100-90 = 10 % kuormituksesta)

$$s_{maa} = \frac{\Delta h \cdot q_{maa}}{(1-a) \cdot M} = \frac{7 \cdot 0,1 \cdot 50}{(1-0,349) \cdot 550} = 98 \text{ mm}$$

Toinen iterointikierros:

*Kaava 4: (tarkempi arvio: pilarit ottavat 95 % kuormasta)*

$$s_{pil} = \frac{7 \cdot 0,95 \cdot (2,5 \cdot 20)}{0,349 \cdot 17900} = 53,2 \text{ mm}$$

*Kaava 7: (maan ottaessa vastaavasti 100-95 = 5 % kuormituksesta)*

$$s_{maa} = \frac{7 \cdot 0,05 \cdot 50}{(1 - 0,349) \cdot 550} = 48,9 \text{ mm}$$

Nyt  $s_{pil} \approx s_{maa}$  riittävällä tarkkuudella

*Kaava 10: pilarille tuleva puristusjännitys*

$$\sigma_{pil} = \frac{q_0 - q_{maa}}{a} + \frac{q_{liik}}{a} = \frac{50 - 0,05 \cdot 50}{0,349} + \frac{10}{0,349} = 165 \text{ kPa}$$

*Puristumurtotilan tarkastelusyvyysdeksi valitaan kuivakuorikerroksen alapinta kohdan 5.2 mukaisesti.*

*Kaava 11:*

$$\begin{aligned} \sigma_{murto} &= 2 \cdot \tau_{pil} + k_h \cdot \sigma_h = 2 \cdot 100 + 1 \cdot \left(1,5 \cdot 15 + \frac{2,5 \cdot 20}{2}\right) \\ &= 247 \text{ kPa} \end{aligned}$$

*Kaava 13:*

$$\sigma_{myötö} = 0,7 \cdot \sigma_{murto} = 0,7 \cdot 247 \text{ kPa} = 173 \text{ kPa} > 165 \text{ kPa}$$

Verrataan kaavan 10 ja kaavan 13 tulosta toisiinsa ja todetaan, että pilarin puristusjännitys ei ylitä myötörajaa.

Määritetään pilarointileveys (kuva 13).

Tarkistetaan pilaroidun penkereen vakavuus. Minimivaatimukset ylitetään. OK

## 2. Mitoitetaan sama kohde myötävänä pilarina

Tarkistetaan kriteerit:

- sideaine OK
- pilarilujuudeksi 10-kertainen pohjamaan lujuus eli 90 kPa
- varmuus ilman pilareita 1,01 eli riittävä
- pehmeän savikerroksen painumaksi sallitaan enintään 0,21 m
- penkereelle varattava ainakin 3-6 kk painuma-aikaa

Aloitetaan myötävän pilaroinnin mitoitus (liite 1). Tarvittava k/k-väli vakavuuden perusteella on enintään 1,20 m. Pilarien suhteellinen pinta-ala  $a$  on tällöin 0,196.

Kaava L1:

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} = 2,5 \cdot 20 - 0,7 \cdot 0,196 \cdot 227 = 18,9 \text{ kPa}$$

Kaava 7:

$$s_{\text{maa}} = \frac{\Delta h \cdot q_{\text{maa}}}{(1-a) \cdot M} = \frac{7 \cdot 18,9}{(1-0,196) \cdot 550} = 299 \text{ mm} > 250 \text{ mm (eli liikaa)}$$

$$\varepsilon_{\text{maa}} = \frac{s_{\text{maa}}}{\Delta h} = \frac{0,299}{7} = 0,043 < 0,05\% \text{ (sallittu)}$$

Kaavoilla 10-13 tarkastellen pilarin puristusjännitys ylittää myötörajan (70 % murto-kuormasta) savikerrostuman alarajallakin, joten kaavan (7) antama painuma vastaa todellisuutta.

Kokeillaan k/k-väliä 1,10 m. Pilarien suhteellinen pinta-ala  $a$  on 0,234.

Kaava L1:

$$q_{\text{maa}} = q_0 - 0,7 \cdot a \cdot \sigma_{\text{murto}} = 2,5 \cdot 20 - 0,7 \cdot 0,234 \cdot 227 = 12,8 \text{ kPa}$$

Kaava 7:

$$s_{\text{maa}} = \frac{7 \cdot 12,8}{(1-0,234) \cdot 550} = 213 \text{ mm} < 250 \text{ mm (sallittu)}$$

$$\varepsilon_{\text{maa}} = \frac{0,213}{7} = 0,030 < 0,05\% \Rightarrow \text{suhteellinen kokoonpuristuma OK}$$

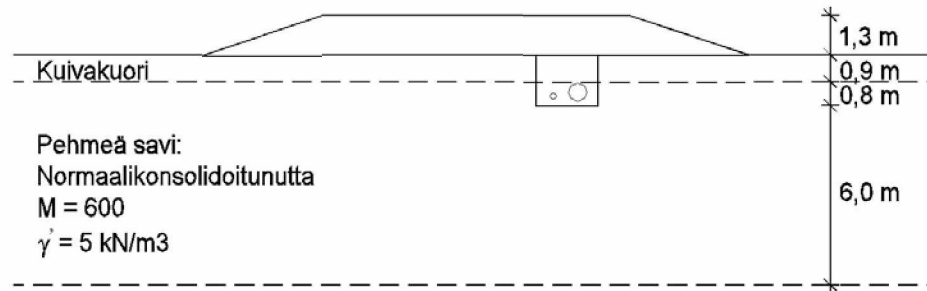
Kaavoilla 10-13 tarkastellen pilarin puristusjännitys ylittää myötörajan (70 % murto-kuormasta) 3,5 m syvyyteen asti, siis 3,5 -1,5 = 2,0 m syvyyteen kuivakuoren alarajasta. Nyt voidaan tarkastella kaavan (7) antamaa painumaa tarkemmin asettamalla painuvan kerroksen paksuudeksi 7 m sijasta 2 m. Laskennallinen painuma pienenee näin 61 mm:iin.

Liitteessä 1 esitetyn oletuksen mukaan painuman voidaan olettaa tapahtuvan 6 kuukaudessa, kun myötävän kerrostuman paksuus on 2-3 metriä.

Tämä esimerkkitapaus, jossa savikerrostuman ominaisuudet ja oletettu pilarilujuus jatkuvat vakiona saven pohjaan saakka johtaa siihen, että myötäävän kerroksen paksuus on varsin herkkä lähtötietojen, varsinkin pilarilujuuden, muutokselle. Esimerkiksi 2,5 m syvyydessä (siis 1 m kuivakuoren alapinnasta) pilarin puristusjännitys on 71,5 % murtokuormasta (>70 %, siis myödon puolella). Tarkasteltaessa syvyyttä 4,5 m pilarin puristusjännitys on 68,6 % (<70 %, siis kimmoisalla alueella) ja savikerrostuman alarajalla 63,5 % murtokuormasta.

Kaava 14, jota siis sovellettaisiin suuremmilla myötäävän kerroksen paksuuksilla kuin 3 m antaisi: Konsolidaatioaste  $U = 87\%$  6 kuukaudessa (kaksisuuntainen konsolidaatio, pilarit yksinkertaisessa neliöverkostossa). Vastaavasti  $U = 93\%$  8 kuukaudessa.

## Esimerkkitarkastelu putkijohtojen perustamisesta



Muut lähtötiedot: Pohjaveden alenema 0,8 m

### 1. Aluksi penkereen alle normaali kimmoisan pilaroinnin mitoitus (kohta 5.2):

Lujuuskokeiden perusteella pilarin leikkauslujuudeksi on määritetty 120 kPa. Pilarin halkaisijaksi valitaan 600 mm.

Päädytään pilarien k/k-väliin 1,20 m. Pilarien puristusjännitys on tällöin 63,8 % murtokuormasta ja laskettu painuma 56 mm. Tällä 56 mm painumalla ei ole käytännön merkitystä, sillä se tapahtuu varsin varmasti ennen kuin tietä ehditään päällystää.

### 2. Mitoitetaan tihennetty pilarointi putkijohtojen kohdalle

Kokeillaan, millä k/k-välillä päästään siihen, että pilarit eivät myötää. Päädytään k/k-väliin 1,00 m. Pilarien puristusjännitys on tällöin 68,2 % murtokuormasta ja laskettu painuma 45 mm. Tämä on putkijohdon kannalta todellista ja huomioonotettavaa painumaa, ja on harkittava, voidaanko se varmasti sallia.

Jos neliöverkkoon 1,20 m k/k-välillä sijoitettujen pilarien väliin kunkin neliön keskelle tehtäisiin lisäpilari, pilaroinnin k/k-väli vastaisi 0,85 metriä. Pilarien puristusjännitys on tällöin 50,4 % murtokuormasta ja laskettu painuma 33 mm.



## Laadunvalvonta

Taulukko L1. Pilaristabiloinnin kelpoisuuden osoittamisen vaiheet ja menetelmät.

Asia	Mittausmenetelmä	Vastuu
<i>a. Käytettävä materiaali (sideaine)</i>		
Sideaineen kelpoisuus	CE-tuoteseloste, tuotehyväksyntä tai rakennuspaikkakohtaiset kokeet	Urakoitsija ja sideainetoimittaja
Sideaineen suunnitelmanmukaisuus	Näyte	Urakoitsija ja paikallisvalvoja

<i>b. Pilaristabilointityön tekeminen</i>		
Pilarikenttien ja yksittäisten pilarien sijainti	Pilareiden sijainnista laaditaan alueittain tarkepiirustukset, joista ilmenevät vähintään pilarikenttien uloimpien pilareiden yläpäiden sijainti (xyz) ja yksittäisten pilarien numerointi (kartta).	Urakoitsija ja paikallisvalvoja
Työssä käytettävä laitteisto	Hyväksyttäminen rakennuttajalle (ja tarvittaessa suunnittelijalla) ennen pilarointityön aloitusta.	Urakoitsija ja suunnittelija
Stabilointityön dokumentointi pilarointipöytäkirjalla	Suunnitelma-asiakirjoissa esitettyjen havaintojen kirjaaminen (automaattinen ja/tai manuaalinen), mm: pilaritunniste, teko-päivämäärä, sijainti, kaltevuus, käytettävä sideaine, pilarin halkaisija, pilarin ylä- ja alapään korkeustaso, sekoituskärjen nousu- ja pyöritysnopeus sekä pyöritykseen tarvittava vääntömomentti (pilarin syvyyden mukaan), syötettävän sideaineen määrä ja syöttöpaine (pilarin syvyyden mukaan kg/pilarimetri ja kokonaisuutena kg/pilari) ja mahdolliset häiriön pilarinteossa.	Urakoitsija ja paikallisvalvoja
Sideaineen syötön tasaisuus	Määrän mittaus vähintään 200 mm välein. Mittauksen tarkkuus. Yksittäinen ja keskimääräinen poikkeama suunnitelmissa esitettyyn nähden.	Urakoitsija ja paikallisvalvoja

<i>c. Toteutunut rakenne</i>		
Pilareiden sijainti	Tarkemittaukset (x, y ja z). Tutkitaan pilareiden keskinäinen sijainti ja sijainti suunnitelmiin nähden. Mittaukset esiin-kaivettujen pilarien yläpäistä. Suositellaan tehtäväksi laadunvalvontakairausten yhteydessä.	Urakoitsija, paikallisvalvoja ja riippumaton laadunvalvoja

Pilareiden lujuus ja tasa-laatusuus	Valvoja valitsee tarkemitattavat ja laadunvalvontakairauksin tutkittavat pilarit. Laadunvalvontakairausmenetelmät ja tutkimusmäärät on esitetty suunnitelma-asiakirjoissa. Normaaaleissa pilareissa kairausmenetelminä ovat mm. pilari- ja pilarisii-pikairaus, puristinheijari- ja CPTU-kairaus, näytteenotto + puristuskoe laboratoriossa ja monikanavaporaus. Korkeissa pilarilujuuksissa voidaan käyttää harkinnan mukaan puristinheijari- ja CPTU-kairausta sekä monikanavaporausta. Näytteenotto + puristuskoe (1 tai 3-aks. näytteen laadusta riippuen) laboratoriossa täydentävät kaikkia kairaustuloksia.	Paikallisvalvoja ja riippumaton laadunvalvoja
Sideaineensyötön tasaisuus ja toteutuman seuranta	Laadunvalvontakairaukset ja tutkittujen pilarien pilarointipöytäkirjojen havainnot ja poikkeamat suunnitelmissa esitettyyn nähden. Tarvittaessa näytteenotto ja sideainepitoisuuden määrittäminen tutkimuslaboratoriossa (titraamalla, XRF, pH-mittaus).	Riippumaton laadunvalvoja ja paikallisvalvoja
Laadunvalvontakairausten raportointi	Suoritettujen laadunvalvontakairausten analysointi ja vertaaminen asetettuihin vaatimuksiin pilarikohtaisesti ja keskimäärin. Arvio suoritettujen kairausten edustavuudesta.	Riippumaton laadunvalvoja

Taulukko L2. Massastabiloinnin kelpoisuuden osoittamisen vaiheet ja menetelmät.

Asia	Mittausmenetelmä	Vastuu
<i>a. Käytettävä materiaali (sideaine)</i>		
Sideaineen kelpoisuus	CE-tuoteseloste, tuotehyväksyntä tai rakennuspaikkakohtaiset kokeet	Urakoitsija ja sideainetoimittaja
Sideaineen suunnitelmanmukaisuus	Näyte	Urakoitsija ja paikallisvalvoja
<i>b. Massastabilointityön tekeminen</i>		
Massastabiloinnin ja blokkien sijainti	Massastabilointiblokkien sijainnista laaditaan alueittain tarkepiirustukset, joista ilmenevät blokkien sijainti ja numerointi.	Urakoitsija ja paikallisvalvoja
Työssä käytettävä laitteisto	Hyväksyttäminen suunnittelijalla ennen massastabilointityön aloitusta	Urakoitsija ja suunnittelija



Stabilointityön dokumentointi stabilointipöytäkirjalla	Suunnitelma-asiakirjoissa esitettyjen havaintojen kirjaaminen (automaattinen ja/tai manuaalinen), mm: blokin tunniste, teko-päivämäärä, sijainti, käytettävä sideaine, blokin vaakamitat, blokin ylä- ja alapinnan korkeustaso (yläpinta myös sekoituksen jälkeen), sekoitustyön määrä (sekoitusai-ka/blokki, työn aluksi määritetään riittävä vaaka- ja pystysekoitusten määrä), blok-kiin syötettävän sideaineen määrä (kg/blokki) ja mahdolliset häiriön stabi-loinnissa.	Urakoitsija ja pai-kallisvalvoja
Tiivistyspenger	Valvotaan suodatin-/lujitekankaan laatu ja limitys sekä tiivistyspenger materiaalin laatu ja paksuus. Tarvittaessa tarkenne-taan tiivistyspenkereen paksuus.	Urakoitsija ja pai-kallisvalvoja
Sideaineen syötön tasai-suus	Blokkiin syötetyn sideaineen määrä ver-rattuna tavoitearvoon ja suunnitelmissa esitettyyn sekä mittauksen tarkkuus.	Urakoitsija ja pai-kallisvalvoja

*c. Toteutunut rakenne*

Blokkien sijainti	Tarkemittaukset (xyz). Tutkitaan blokkien keskinäinen sijainti ja sijainti työpiirus-tuksiin nähden. Mittaukset esiinkaivettu-jen blokkien reunoista. Suositellaan teh-täväksi laadunvalvontakairauksen yhtey-dessä. Uloimpien blokkien sijainti aina tarkemitataan (xyz)	Urakoitsija, paikal-lisvalvoja ja riippu-maton laadunvalvo-ja
Tiivistyspenger	Tiivistyspenkereen paksuuden ja materi-aalin tarkistus koekuopista.	Riippumaton laa-dunvalvoja
Blokkien lujuus ja tasalaa-tuisuus	Valvoja valitsee tarkemitattavat ja laadun-valvontakairauksin tutkittavat blokit. Laa-dunvalvontakairausmenetelmät ja tutki-musmäärät on esitetty suunnitelma-asiakirjoissa. Kairausmenetelminä ovat mm. pilari- ja pilarisiipikairaus, puristin-heijari- ja CPTU-kairaus, näytteenotto + puristuskoe laboratoriossa.	Paikallisvalvoja ja riippumaton laa-dunvalvoja
Sideaineensyötön tasai-suus ja toteutuman seuran-ta	Laadunvalvontakairaukset ja tutkittujen blokkien stabilointipöytäkirjojen havain-not ja poikkeamat suunnitelmissa esitet-tyyn nähden. Tarvittaessa näytteenotto ja sideainepitoisuuden määrittäminen tut-kimusalatoriossa (titraamalla, XRF, pH-mittaus).	Riippumaton laa-dunvalvoja ja pai-kallisvalvoja

---

Laadunvalvontakairausten raportointi	Suoritettujen laadunvalvontakairausten analysointi ja vertaaminen asetettuihin vaatimuksiin blokkikohtaisesti ja keskimäärin. Arvio suoritettujen kairausten edustavuudesta.	Riippumaton laadunvalvoja
--------------------------------------	--	---------------------------



Liik  
enne  
vira  
sto

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-031-6

[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)